



Afonso Belchior Burnay Bastos

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização da degradação estrutural baseada no estudo das propriedades dinâmicas de uma estrutura

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Professor Filipe Pimentel Amarante dos Santos
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Professor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Professor Rui Pedro César Marreiros
Vogal: Professor Filipe Pimentel Amarante dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro de 2017

“Copyright” Afonso Belchior Burnay Bastos, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dissertação redigida conforme o Acordo Ortográfico de 1945, aprovado pelo Decreto n.º 35.228, de 8 de Dezembro.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de deixar um sincero agradecimento ao meu orientador e ao meu co-orientador, Professor Filipe Santos e Professor Eduardo Cavaco, por todos os conhecimentos transmitidos, o apoio e a enorme disponibilidade demonstrados e especialmente pelo voto de confiança em mim.

Um obrigado ao Engenheiro Nuno Dinarte e ao Engenheiro Tiago Simões, pela extraordinária disponibilidade demonstrada e pela ajuda prestada durante os trabalhos laboratoriais desta dissertação.

Quero deixar, um sentido agradecimento, a toda a minha família e amigos, por todo o apoio e incentivo que me deram, sem eles esta etapa seria inalcançável. Em especial, à minha namorada Catarina.

À minha Mãe, um obrigado, por seres sempre o exemplo a seguir.

Resumo

Apesar de todas as melhorias ao nível do projecto e da construção de estruturas, o tempo de vida útil de uma estrutura encontra-se quase sempre limitado, caso não ocorram reabilitações. Isto sucede devido a diferentes tipologias de dano que podem ocorrer numa estrutura. O seu colapso gera vários problemas económicos, sociais e possivelmente ambientais. Dos vários danos que podem afectar uma estrutura, a corrosão é dos mais frequentes. Para além dos efeitos directos no aço, a corrosão leva também a uma deterioração do betão envolvente, fragilizando toda a estrutura.

Este trabalho pretende aprofundar a análise da degradação de dano num elemento estrutural através de diferentes metodologias de diagnóstico de dano baseadas em parâmetros dinâmicos. Realizando-se uma avaliação da qualidade destes métodos durante o avolumar de dano na estrutura, sendo este dano imposto na estrutura através de uma técnica de corrosão acelerada, de forma a ser possível estudar o desenvolvimento do dano e os efeitos contínuos e finais da degradação na estrutura.

Os métodos de avaliação de dano analisados são os métodos baseados em alterações das frequências próprias, em variações dos modos de vibração e em variações das curvaturas. Para além destes métodos associados a propriedades dinâmicas da estrutura, é também analisada a deformada que ocorre a meio vão nos modelos, como método de controlo de dano e, para isso, realizaram-se análises modais e de deformada durante a colocação de dano.

Foram danificadas dez vigas pré-esforçadas através do método de corrosão acelerada. Em todos estes modelos, o resultado final da corrosão foi conhecido com precisão, após a colocação de dano. Posteriormente à conclusão do dano, os varões foram todos limpos de qualquer resíduo corroído. Os modelos foram testados à flexão até atingirem o colapso, assim como os fios de aço dos modelos foram testados à tracção.

Palavras-chave

Análise de dano, curvatura, modos de vibração, frequência própria, corrosão de varões, técnica de corrosão acelerada

Abstract

Despite the improvement in the structural design status, the lifetime of a structure is, in general, finite, without any rehabilitation. This happens because of different types of damage that can occur in a structure. The collapse of a structure brings many problems, especially economical, social and possibly environmental. From the different types of damage that can strike a structure, the corrosion is one of the most common one. Beyond the effects of corrosion has on steel, there is also the deterioration in the wrapping concrete, weakening all the structure.

The scope of this work is to analyse the degradation in a structural element through different types of damage assesement methodologies based in dynamic parameters. It is carried out an evaluation of the quality of these methods during the increase of damage in the structure. The corrosion applied to the model is made during the process, in order to make it possible to analyze the damage evolution while a continuous and final evaluation is done on the structure.

The analyzed damage identification methods are the methods based in the frequency variation, in the modification of the mode Shape and in the modification of the curvature. In addition to this, the deformation at mid-span, as damage control was also considered and a modal and deformation analysis was done during the damage implantation.

There were ten prestressed beams damaged through the method of accelerated corrosion. In all these models, the result of the corrosion was known with precision after the setting of the damage, for such purpose, the steel bars were cleaned of any corroded residue. The models were tested to bending up to collapse, while the bars were tested to tensile strength.

Keywords

Damage assessment, curvature, mode shape, natural frequency, reinforcement corrosion, accellerated corrosion technique

Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivações	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 Estado de Arte	5
2.1 Corrosão	5
2.1.1 Corrosão em Estruturas de Betão Armado	10
2.2 Mecanismos de Deterioração	12
2.3 Métodos de Análise de Dano	14
2.3.1 Métodos Baseados nas Alterações das Frequências Próprias	15
2.3.2 Métodos Baseados nas Alterações dos Modos de Vibração .	16
2.3.3 Métodos Baseados em Alterações nas Curvaturas	17
2.3.4 Métodos Baseados nas Variações da Matriz Flexibilidade . .	19
3 Métodos Experimentais	21
3.1 Materiais	21
3.2 Ensaio Corrosão Acelerada	22
3.3 Metodologias dos Ensaios Experimentais	27
3.3.1 Parâmetros Dinâmicos e Deformada	28
3.3.2 Ensaios Destrutivos	32

4	Resultados e Discussão	37
4.1	Corrosão Acelerada	37
4.2	Ensaio Experimentais	42
4.2.1	Frequências Próprias de Vibração	42
4.2.2	Método da Variação dos Modos de Vibração	43
4.2.3	Método da Variação da Curvatura	50
4.2.4	Deformada	59
4.2.5	Ensaio Destrutivos	60
5	Conclusão e Desenvolvimentos Futuros	71
5.1	Conclusões	71
5.1.1	Métodos de Análise de Dano	71
5.1.2	Corrosão	72
5.2	Desenvolvimentos Futuros	72
	Bibliografia	75
A	Frequência Própria da Viga Simplesmente Apoiada	81
B	Ficha Técnica das Vigas	83
C	Fendas Laterais nos Modelos	87

Índice de Figuras

1.1	Exemplo de colapsos ocorridos. (a) Colapso da Silver Bridge, (b) Colapso da I-35W Mississippi River bridge, (c) Colapso da Ponte Hintze Ribeiro e (d) Colapso do Rana Plaza.	2
2.1	Pilha eletroquímica.	7
2.2	Pilha eletrolítica de ferro.	7
2.3	Curvas representativas da velocidade de corrosão. (Retirado de [26])	9
2.4	Célula de corrosão a ocorrer dentro do betão. (Adaptado de [10])	10
2.5	Fluxograma efeitos da corrosão. (Adaptado de [23])	11
2.6	Exemplo de dois modos de corrosão na secção de um varão: (a) ataque corrosivo por <i>píte</i> ; (b) ataque corrosivo generalizado. (Retirado de [55])	11
2.7	Fluxograma da relação entre os conceitos da durabilidade e da performance. (Adaptado de [12])	13
2.8	Relações decorrentes de um elemento tipo, em flexão. (Adaptado de [29])	18
3.1	Geometria da secção das vigas ensaiadas, em mm.	22
3.2	Fonte de alimentação utilizada.	23
3.3	Ligação entre a fonte de alimentação e os modelos	24
3.4	Esquema da pilha eletrolítica do modelo de dano.	25
3.5	Fotografia do modelo V1 sem dano na qual é visível a ligação do ânodo e do cátodo.	25
3.6	Esquema e designação dos cortes realizados no fio de aço, em cm.	27
3.7	Fotografia de um fio de aço cortado em troços durante o processo de desoxidação.	27
3.8	Acelerómetros utilizados, da esquerda para a direita: 393B04, 333B42 e o 333B52.	29
3.9	Representação da colocação dos acelerómetros, em cm.	29
3.10	Definição da geometria do modelo no <i>software Artemis</i>	30
3.11	Representação gráfica dos quatro primeiros modos de vibração, por ordem crescente: vermelho, verde, azul e amarelo. (Retirado de [41])	31
3.12	Modelo das diferenças finitas centradas. (Adaptado de [29])	31
3.13	Esquema da aplicação da carga, em cm.	33
3.14	Exemplo de um modelo preparado para o ensaio de carga última.	34

3.15 Fotografias retiradas aquando do ensaio de tracção. (a): máquina utilizada para a realização do ensaio; (b): provete preparado para ser ensaiado; (c): provete após rotura.	35
4.1 Valores de X_p	38
4.2 Pormenor do ataque corrosivo no fio de aço.	39
4.3 Percentagem de dano por troço ao longo de cada modelo.	41
4.4 Gráfico do desenvolvimento das frequências ao longo da introdução de dano através do programa <i>Artemis</i>	44
4.5 Gráfico da percentagem da frequência própria final tendo em conta a inicial.	44
4.6 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V1_2.	45
4.7 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V2_8.	45
4.8 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V3_6.	45
4.9 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V4_9.	46
4.10 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V5_15.	46
4.11 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V6_17.	46
4.12 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V7_23.	47
4.13 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V8_29.	47
4.14 Função forma do modelo V9.1_23 durante a imposição de dano. . .	47
4.15 Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V9.2_40.	48
4.16 Fendas longitudinais recorrentes nos modelos.	48
4.17 Fenda na face inferior dos modelos.	48
4.18 Face lateral do modelo V2_8 após a introdução de dano.	49
4.19 Modelo V9.2_40 após a introdução de dano, sem contacto com a solução líquida.	49
4.20 Face lateral do modelo V7_23 após a introdução de dano.	49
4.21 Pormenor do colapso ocorrido no modelo V9.1_23.	50
4.22 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V1_2.	51
4.23 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V2_8.	52
4.24 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V3_6.	53
4.25 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V4_9.	53
4.26 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V5_15.	54
4.27 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V6_17.	55
4.28 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V7_23.	56
4.29 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V8_29.	56
4.30 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V9.1_23.	57
4.31 Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V9.2_40.	58
4.32 Gráfico da deformada em cada análise realizada.	59
4.33 Gráfico da deformada realizada na última análise de cada modelo. .	60
4.34 Gráfico Força-deslocamento para os provetes de aço ensaiados. . .	61
4.35 Gráfico tensão-deformação para os provetes de aço ensaiados. . .	62
4.36 Gráfico da tensão média máxima suportada pelos provetes.	63
4.37 Gráfico da deformação média máxima em função do nível de corrosão. .	63
4.38 Gráfico da diferença da deformação média máxima e a deformação média no início da plastificação, em função do nível de corrosão. . .	64

4.39 Gráfico da evolução da carga e da deformação de vários modelos, até atingirem o colapso.	65
4.40 Gráfico da carga última de cada viga com a respectiva percentagem de corrosão.	66
4.41 Gráfico do Momento último de cada viga com o respectivo X_p	66
4.42 Gráfico do momento flector último adimensional em função do nível de corrosão.	67
4.43 Gráfico do momento flector último adimensional em função do nível de corrosão do troço do meio.	68
C.1 Fenda na face oblíqua dos modelos	87
C.2 Fenda na face vertical dos modelos	88

Índice de Tabelas

3.1	Designação e percentagem da corrosão pretendida em cada modelo	23
3.2	Tempo necessário para cada modelo obter o dano necessário . . .	26
3.3	Modelos dos acelerómetros utilizados	29
4.1	Corrosão real obtida por modelo	38
4.2	Percentagem do erro entre a corrosão pretendida e a obtida	39
4.3	Percentagem de corrosão e secção transversal de cada troço	40
4.4	Desvio padrão dos troços dos modelos	42
4.5	Síntese dos resultados dos ensaios de carga	69

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

Abreviaturas

COMAC	<i>Coordinate Modal Assurance Criterion</i>
CVA	<i>Canonical Variate Analysis</i>
EN-ISO	<i>European Norm-International Organization for Standardization</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>
MEF	Modelo de Elementos Finitos
PIB	Produto Interno Bruto
TD	Técnicas de Ensaio Destrutivas
TND	Técnicas de Ensaio Não Destrutivas
UNL	Universidade Nova de Lisboa
UPC	<i>Unweighted Principal Components</i>

Símbolos

Alfabeto Latino

A_f	Secção transversal final
A_l	Área da superfície exterior
c	Recobrimento
E	Módulo de elasticidade ou Módulo de Young
EI	Rigidez de flexão
F	Constante de Faraday
f	Frequência própria

$[F]$	Matriz flexibilidade
$[F^*]$	Matriz de flexibilidade da estrutura sem dano
h	Comprimento de um elemento finito
I	Momento de inércia
I_{app}	Intensidade de corrente aplicada
I_{corr}	Intensidade de corrente real aplicada
K	Rigidez estrutural
L	Comprimento
M	Momento flector
m	Massa
M^*	Momento flector máximo num elemento sem dano
M_{ac}	Massa real perdida devido à corrosão
M_{th}	Massa teórica perdida devido à corrosão
$M_{u,i}$	Momento flector último no modelo i
P	Carga aplicada no ensaio da flexão
Ph	Potencial de hidrogénio
P_u	Carga última
$P_{u,i}$	Carga última aplicada no modelo i
R	Raio de Curvatura
T	Tempo
W	Massa equivalente
w_f	Massa final
w_i	Massa inicial
X_p	Percentagem de massa perdida devido à corrosão
y	Distância da linha neutra a uma fibra da viga

Alfabeto Grego

χ	Curvatura
δ	Deslocamento
$[\Delta F]$	Matriz da diferença das matrizes de flexibilidade
$\Delta\phi_{i,j}$	Variação do modo de vibração j no nó i
$\Delta\phi_q''$	Diferença da curvatura no ponto q
ε	Deformação
ε_{max}	Máximo da deformação média
$\varepsilon_{média}$	Deformação média
ε_y	Deformação do início da plastificação
Φ	Diâmetro do varão
$[\phi]$	Matriz dos modos de vibração, normalizado pela matriz massa generalizada
$\phi_{i,j}$	Modo de vibração j no nó i , de uma estrutura
ϕ_q	Valor da função forma no ponto q
ϕ_{q+1}	Valor da função forma no ponto $q + 1$
ϕ_{q-1}	Valor da função forma no ponto $q - 1$
$\phi_{i,j}^*$	Modo de vibração j no nó i , de uma estrutura sem dano
ϕ''	Segunda Derivada da função modo ou Curvatura
ϕ_q''	Curvatura no ponto q
$\phi_{q,Xp}''$	Curvatura da análise com X_p de corrosão, no ponto q
$\phi_q^{''*}$	Curvatura no ponto q , numa estrutura sem dano
$[\Omega]$	Matriz diagonal com os quadrados das frequências próprias
σ	Desvio padrão
$\sigma_{relativo}$	Desvio padrão relativo
$\sigma_{média}$	Tensão média
σ_u	Tensão última

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

De forma a garantir que uma estrutura se encontre em funcionamento durante o tempo de vida útil estipulado, o ramo da Engenharia Civil tem realizado um forte investimento em metodologias de análise e controlo das características das estruturas, designadamente o dano que lhes possa ocorrer, sendo que o dano pode levar a alterações das propriedades dinâmicas da estrutura, devido a alterações na rigidez da mesma [29]. Desta maneira, eventos como: Silver Bridge entre Virgínia e Ohio (1967)(Figura 1.1(a)), Mianus River Bridge em Connecticut (1983), Seongsu Bridge em Seul (1995), Ponte Hintze Ribeiro em Castelo de Paiva (2001)(Figura 1.1(c)), I-35W Mississippi River bridge em Minneapolis (2007)(Figura 1.1(b)), Rana Plaza em Daca (2013)(Figura 1.1(d)), entre muitos outros, poderiam ter sido evitados, caso os danos que levaram ao colapso tivessem sido detectados a tempo.

Um método perfeito de detecção de dano seria aquele que conseguisse registar de imediato o seu aparecimento, a sua intensidade e a sua localização e com base nestes parâmetros estimar o tempo de vida útil da estrutura. No entanto, os métodos de avaliação de dano existentes encontram-se sobretudo ligados a variações das características dinâmicas existentes nas estruturas [22] e desta forma, dificilmente podem ser considerados perfeitos.

Estes métodos baseados em características dinâmicas de uma estrutura assumem, frequentemente, um comportamento linear e actuam em regra tendo em consideração alterações das frequências próprias, das propriedades modais, da curvatura e da flexibilidade [29].

Em todos os países a corrosão tem um forte impacto ambiental e económico, sendo, a perda de vidas, devido ao colapso estrutural, a principal preocupação.

No sector económico, a título de exemplo, nos Estados Unidos da América, os custos directos e indirectos, relacionados com a corrosão, em 2002, foram de aproximadamente 276 mil milhões de dólares [33] e 35 % deste valor podia ter sido

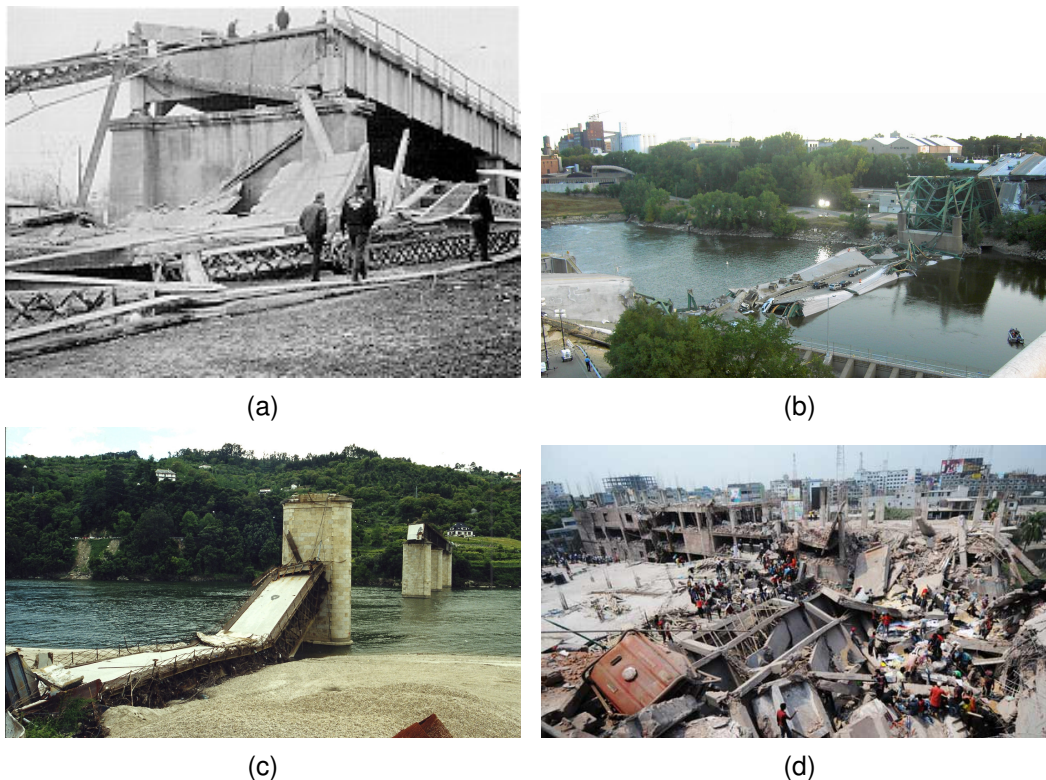


Figura 1.1: Exemplo de colapsos ocorridos. (a) Colapso da Silver Bridge, (b) Colapso da I-35W Mississippi River bridge, (c) Colapso da Ponte Hintze Ribeiro e (d) Colapso do Rana Plaza.

poupado caso tivessem sido tomadas as devidas precauções [4]. Em Portugal, foi estimado pela Divisão Técnica de Corrosão e Protecção de Materiais, que em 2013 os custos relacionados com a corrosão fossem entre 3 % a 4 % do PIB, o que nesse ano se traduziria num custo aproximado de 5 mil milhões de euros[18]. A nível ambiental, foi estimado que 30 % do aço fabricado no mundo é aplicado em reforço ou reparação de elementos corroídos, sendo as estruturas o principal destino [36].

Os efeitos de degradação em estruturas de betão armado devido à corrosão, podem ser vários. No aço, os principais efeitos são a diminuição da secção do varão e a perda de ductilidade. Enquanto que no betão, o problema principal é a diminuição da secção útil de betão, devido a fendilhações, degradação das ligações dos inertes ou a desagregação do betão de recobrimento [26].

1.2 Motivações

A principal motivação inerente a este trabalho é o diagnóstico de dano em estruturas reais, através de algumas metodologias não destrutivas. Apesar da existência de uma grande diversidade de estudos e métodos de detecção de dano,

através das propriedades dinâmicas de uma estrutura, a grande generalidade dos trabalhos realizados nesta área, tem por base modelos numéricos, contudo, não existe, actualmente, trabalho relevante de diagnóstico de dano através de propriedades dinâmicas em estruturas reais [22].

Em simultâneo com o estudo da análise de dano, através das diferentes metodologias de diagnóstico, o segundo fundamento para a realização desta dissertação foi a caracterização da degradação de um elemento estrutural, associada a uma corrosão controlada.

Assim sendo, o presente trabalho teve os seguintes objectivos principais:

- Avaliação da qualidade das metodologias de diagnóstico de dano baseadas, em parâmetros dinâmicos;
- Caracterização da degradação da resistência de uma viga de betão armado pré-esforçado por pré-tensão, devido a corrosão nas armaduras;
- Avaliação do impacto da corrosão na ductilidade do mecanismo de rotura.

1.3 Organização da Dissertação

Este documento foi dividido em 5 capítulos, incluindo a introdução e as conclusões.

No **capítulo 1** é realizada uma breve introdução sobre os temas que serão abordados, assim como as motivações que levaram à realização do trabalho.

O **capítulo 2** encontra-se dividido em três secções e trata-se de um levantamento da bibliografia existente sobre os temas abordados nesta dissertação. Na primeira secção analisa-se, por um lado, o tema da corrosão e por outro, elabora-se uma síntese sobre os principais efeitos da corrosão em estruturas de betão armado. Na segunda secção, são abordadas as características da degradação estrutural e na última secção deste capítulo, efectua-se um resumo bibliográfico sobre a análise de dano baseado em parâmetros dinâmicos.

No **capítulo 3** descreve-se o programa experimental utilizado para provocar dano nos modelos, através da corrosão acelerada, assim como as metodologias empregues nos ensaios de carga última nos modelos e de tracção nos varões. É também abordado o processo de obtenção de dados a analisar nos métodos de diagnóstico de dano e a forma como estes métodos são realizados.

No **capítulo 4** são apresentados os diferentes resultados obtidos. Na primeira secção apresentam-se os valores da corrosão real, sendo realizada uma comparação com o nível de dano teórico. Na segunda secção encontram-se representados as análises de dano através dos diferentes métodos de avaliação e são apresentados também os resultados obtidos nos ensaios destrutivos de

caracterização da degradação, através de corrosão, realizados.

No último capítulo, **capítulo 5**, apresentam-se as conclusões finais do trabalho e propõem-se desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estado de Arte

No presente capítulo será realizado um resumo da bibliografia mais relevante para o presente trabalho. Na secção 1, será abordada a definição de corrosão e os seus efeitos em estruturas de betão armado. De seguida serão abordados os possíveis mecanismos de deterioração de uma estrutura de betão armado e na última secção deste capítulo, o tema será a revisão bibliográfica de estudos sobre metodologias de análise de dano.

2.1 Corrosão

O estudo dos efeitos da corrosão são relativamente recentes. Segundo Gentil (1996) [26], o estudo da corrosão é relativamente novo, tendo em consideração a data de começo da utilização de metais.

Todavia, o estudo do processo eletroquímico teve um forte impulso na primeira metade do século XIX, através de alguns estudos realizados por Faraday, Rive e Becquerel, entre outros [28].

A corrosão de um elemento metálico pode ser definida como o processo de deterioração ou perda de material, através da acção química ou eletroquímica do meio ambiente e pode também estar associada a uma acção física [26]. O processo corrosivo pode ser apelidado de processo de oxidação, sendo que existe sempre um agente redutor e um agente oxidante. A oxidação pode ser definida como a perda de electrões de um átomo para outro [35], contudo, a oxidação pode também ser definida pelo ganho de oxigénio numa substância [28]. As equações 2.1 e 2.2 demonstram as respectivas definições de corrosão.



O sistema corrosivo pode ser dividido em dois grupos, a corrosão química e a corrosão eletroquímica [40].

A corrosão química é também conhecida por corrosão ou oxidação em altas temperaturas. Esta forma de corrosão é muito pouco frequente na natureza, pois, para este meio corrosivo acontecer, existem geralmente duas condições iniciais que têm de ser respeitadas, nomeadamente a ausência de água em estado líquido e a temperatura bastante elevada. Neste processo existe uma interação directa entre o metal e o meio corrosivo [40].

A corrosão eletroquímica, também designada por corrosão em meio aquoso, é frequente acontecer na natureza. Trata-se de um fenómeno que necessita de algumas condições específicas, entre elas, a necessidade de existência de água em estado líquido e a temperatura abaixo do ponto de orvalho. Assim que ocorram as condições adequadas, forma-se uma célula de corrosão, na qual existem transferências de electrões na superfície metálica [26].

Nos processos de corrosão eletroquímica existem vários modos de ataque corrosivo, no entanto, o modo como se processa é quase sempre o mesmo, através de uma pilha eletroquímica. Na Figura 2.1 está demonstrado uma pilha eletroquímica, na qual se encontram representados os elementos que a constituem e o sentido positivo convencionado da corrente eléctrica na pilha [26].

- Ânodo: eléctrodo em que ocorre a oxidação ou corrosão, o que provoca a perda de electrões, sendo que o eléctrodo tem tendência a perder massa através destes processos. Trata-se do eléctrodo, através do qual, a corrente eléctrica, proveniente de uma fonte de alimentação, entra no eletrólito;
- Eletrólito: é um condutor, geralmente em forma líquida, que contém iões que transportam a energia do ânodo para o cátodo;
- Cátodo: eléctrodo onde ocorre a reacção de redução, que gera um ganho de electrões, sendo comum este eléctrodo ganhar massa através deste processo. Trata-se do eléctrodo, que permite a passagem da corrente eléctrica, do eletrólito, de volta à fonte de alimentação;
- Circuito metálico: ligação metálica entre o ânodo e o cátodo, por onde ocorre o transporte dos electrões, no sentido do ânodo para o cátodo.

Existem diferentes tipos de pilhas eletroquímicas, consoante as condições das experiências e os materiais a analisar. As pilhas de eléctrodos metálicos diferentes são mais conhecidas por pilhas galvânicas e este processo ocorre quando existem dois metais diferentes no mesmo eletrólito. Existem também pilhas de são as de concentração local e neste género de pilhas é frequente que o cátodo e o ânodo sejam constituídos pelo mesmo material, no entanto, o eletrólito apresenta concentrações diferentes em contacto com cada um dos eléctrodos. A pilha de temperaturas diferentes, ou termogalvânica, é também constituída por eléctrodos do mesmo material e imersos no mesmo eletrólito, contudo, os eléctrodos encontram-se com temperaturas diferentes, criando assim, um aumento da velocidade das reacções eletroquímicas [26].

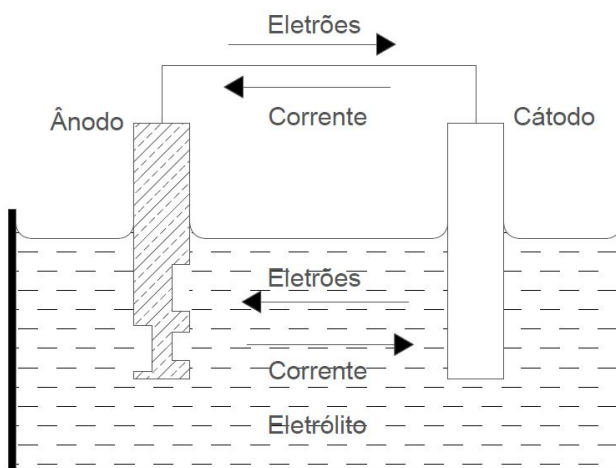


Figura 2.1: Pilha eletroquímica.

Para as experiências realizadas no âmbito desta dissertação, a pilha utilizada foi a pilha eletrolítica. Nas pilhas referidas anteriormente a diferença de potencial entre os elétrodos é devida, unicamente, ao potencial que cada elétron possui. Na pilha eletrolítica a diferença de potencial advém de uma fonte de energia exterior, não sendo necessário que os elétrodos tenham uma composição química diferente. Nesta metodologia um dos elétrodos serve como ânodo activo, perdendo os electrões e oxidando-se, enquanto que o outro elétron funciona como cátodo, recebendo os electrões provenientes da fonte, conforme é apresentado na Figura 2.2 [7, 10].

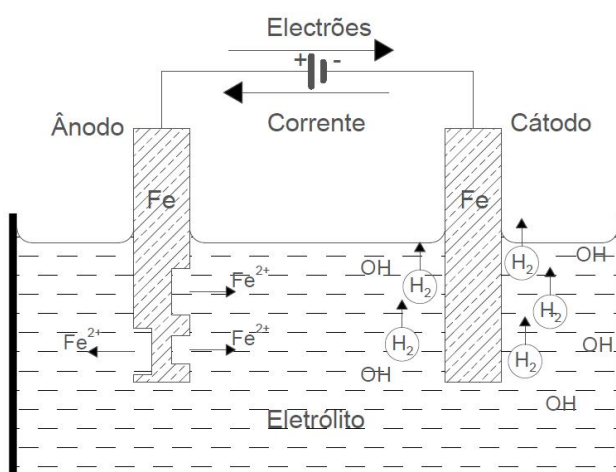


Figura 2.2: Pilha eletrolítica de ferro.

A lei de Faraday permite estimar a perda de massa, perdida pelo elétron que funciona como ânodo. Esta lei é uma relação entre a corrente que é imposta e a massa metálica que foi corroída [3] e pode ser representada através da

equação 2.3.

$$M_{th} = \frac{W \cdot I_{app} \cdot T}{F} \quad (2.3)$$

Na qual,

M_{th} é a massa teórica perdida pelo ânodo, em g/cm²;

W é massa equivalente do ânodo, em g;

I_{app} é a intensidade de corrente eléctrica aplicada por área lateral do ânodo e é expressa em mAmp/cm²;

T é o tempo de duração do ensaio, em s;

F é a constante de Faraday, para as unidades utilizadas o valor é de 96487 Amp/s.

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* [9], a massa de corrosão real num elemento metálico, apenas pode ser avaliada através das massas iniciais e finais deste, surgindo assim a equação 2.4.

$$M_{ac} = \frac{w_i - w_f}{A_l} \quad (2.4)$$

Sendo que,

M_{ac} é a massa perdida devido à corrosão;

w_i é a massa inicial do elemento metálico;

w_f é a massa final do elemento metálico corroído;

A_l é a área da superfície exterior do elemento metálico onde pode ocorrer corrosão.

A velocidade de corrosão pode estar dependente do ataque à membrana passivante, cuja membrana é gerada pela passivação da superfície metálica através de reacções químicas que criam um revestimento à base de óxidos metálicos, impossibilitando o surgimento de processos corrosivos [38]. Na Figura 2.3 encontram-se representadas as curvas de velocidade de um ataque corrosivo [26]:

- Curva A: velocidade de corrosão eletroquímica. Nesta curva a área de corrosão é constante e o produto corroído é um inerte;
- Curva B: idêntica à curva A, mas existe um intervalo de tempo, no qual o agente redutor tenta destruir a membrana passivante;
- Curva C: a velocidade é inversamente proporcional ao produto criado. Nesta curva o produto corroído é insolúvel e adere ao agente corroído, diminuindo a área de corrosão;
- Curva D: velocidade em crescendo. Nesta curva o produto corroído é solúvel, aumentando a área de corrosão.

Shamsad Ahmad realizou um trabalho, de forma a aprofundar o estudo da intensidade de corrente eléctrica de corrosão que provoca oxidação num

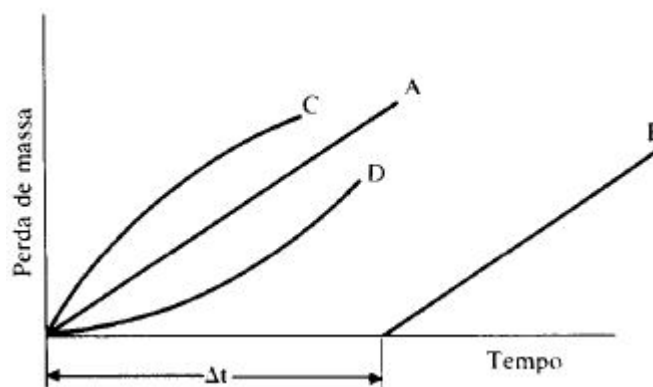


Figura 2.3: Curvas representativas da velocidade de corrosão. (Retirado de [26])

determinado elemento testado [3]. Neste trabalho, verificou-se que a intensidade de corrente eléctrica de corrosão podia ser calculada igualando a equação 2.3 com a equação 2.4, partindo do pressuposto de que as massas corroídas nas duas equações eram iguais. A intensidade de corrente eléctrica de corrosão, que passa pelo cátodo, é designada por I_{corr} e pode ser estimada pela equação 2.5.

$$I_{corr} = \frac{(w_i - w_f) \cdot F}{\pi \phi L \cdot W \cdot T} \quad (2.5)$$

Sendo $\pi \phi L$ a área lateral de um varão com comprimento L e diâmetro ϕ .

Outro aspecto a ter em consideração sobre um processo corrosivo, são as diferentes formas de ataque que a corrosão pode ter no elemento metálico. Os principais modos de corrosão são [26]:

- Uniforme ou Generalizada - A corrosão ocorre em toda a extensão da superfície metálica, sendo a perda de espessura igual ao longo de toda a superfície [39, 26, 47];
- Por Placas - A corrosão ataca só certas regiões da superfície metálica, provocando placas com escavações e alterando assim somente a espessura dessas áreas [4, 26];
- Alveolares - A corrosão ocorre só em certas zonas da superfície, provocando cavidades ou escavações. Apresenta geralmente um fundo arredondado e uma profundidade inferior ao seu diâmetro [26];
- Puntiforme ou *Pite* - Este modo de corrosão processa-se em pontos ou pequenas áreas na superfície metálica, produzindo *pites*. Estes são cavidades com um fundo anguloso, que apresentam profundidades maiores do que o seu diâmetro [4, 26, 35];
- Intergranular ou Cristalina - A corrosão ocorre entre os grãos da rede cristalina do metal, sendo que este perde as suas propriedades mecânicas

e pode fracturar quando tensionado, ocorrendo desta forma, a corrosão sob tensão fracturante [35, 47];

- Intragranular - A corrosão dá-se nos grãos da rede cristalina do metal. O que provoca uma deterioração das suas características mecânicas, sendo que pode fracturar à mínima solicitação, ocorrendo assim também a corrosão sob tensão fracturante [26, 28].

2.1.1 Corrosão em Estruturas de Betão Armado

A corrosão de um elemento presente no interior do betão inicia-se geralmente com a despassivação do betão envolvente, diminuindo assim o Ph de valores próximos a 14, para valores inferiores a 11. Apenas assim é possível a destruição da membrana passivante que envolve e protege o elemento metálico [26]. Na Figura 2.4 é possível verificar como o desenvolvimento de uma célula de corrosão dentro de um elemento betonado.

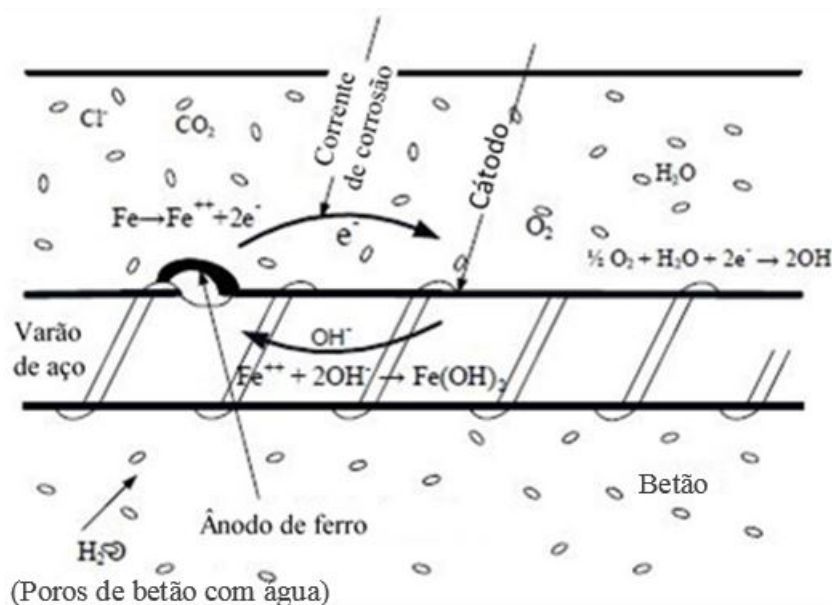


Figura 2.4: Célula de corrosão a ocorrer dentro do betão. (Adaptado de [10])

Existem diversos estudos sobre as hipóteses de análise dos efeitos da corrosão em estruturas de betão armado e de como os avaliar, sendo os principais efeitos: o efeito da corrosão no varão e a alteração das suas características, o surgimento de fendilhação no betão, devido à corrosão do varão e a perda da ligação entre o varão e o betão.

O fluxograma representado na Figura 2.5 demonstra os possíveis efeitos da corrosão dos varões, num elemento de betão armado. É visível, nesta Figura, que os principais efeitos da corrosão são a diminuição da secção do varão, o enfraquecimento e perda da membrana passivante e a expansão volumétrica

existente.



Figura 2.5: Fluxograma efeitos da corrosão. (Adaptado de [23])

Como foi referido na secção 2.1, um dos efeitos da corrosão é a diminuição da espessura do elemento metálico. Assim sendo, num elemento de betão armado, a consequência desta diminuição de espessura é a redução da área da secção transversal do varão. A diminuição da secção do varão pode ser local ou uniforme ao longo de todo o comprimento do varão e uma corrosão localizada pode provocar um possível ponto de fragilização no elemento de betão, diminuindo a ductilidade nesse ponto [38, 23]. Caso a corrosão seja uniforme, todo o elemento fica diminuído em relação à resistência mecânica, não havendo, no entanto, um ponto específico com uma ductilidade inferior ao longo do elemento [6, 25]. A distribuição da corrosão pode ser uniforme ao longo da sua secção ou pode ser por *pite*, como se encontra representado na Figura 2.6 [27].

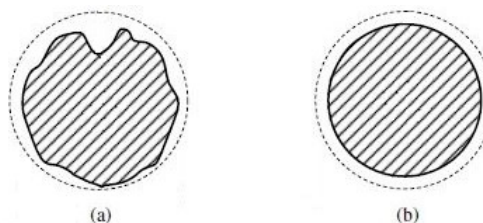


Figura 2.6: Exemplo de dois modos de corrosão na secção de um varão: (a) ataque corrosivo por *pite*; (b) ataque corrosivo generalizado. (Retirado de [55])

A fendilhação é uma das consequências mais comuns na presença de corrosão no betão armado. O que tem justificado um crescente investimento do estudo desta matéria, de forma a realizar com maior rigor o controlo da qualidade e quantidade de corrosão existente nas estruturas.

O surgimento de fendas devido à corrosão encontra-se relacionado com o rácio c/ϕ , no qual c é o recobrimento do varão e ϕ é o diâmetro do mesmo. A fendilhação no betão ocorre devido a pressões internas que são criadas pelo libertar dos produtos corroídos do varão e se o valor do recobrimento aumentar, a capacidade deste, em resistir ao aparecimento de fendilhação, também aumenta [54, 50]. O mesmo acontece com o aumento do valor da capacidade resistente no betão de recobrimento, contudo, a propagação da fenda aparenta não ter conexão, nem com o rácio recobrimento-diâmetro, nem com o tamanho do diâmetro [52]. Sendo o surgimento de fendas uma das consequências da corrosão, são, no entanto, estas que podem aumentar a velocidade de propagação da corrosão, devido ao ingresso de O_2 e H_2O [32].

Um dos efeitos mais relevantes, devido à corrosão do varão de aço num elemento de betão armado, é a perda de ligação entre o varão e o betão [13], sendo que esta ligação é realizada através da aderência entre estes dois elementos e pode ser dividida em três categorias, a saber: a aderência química, a aderência por atrito e a aderência mecânica.

Os efeitos da corrosão na ligação do betão geram diferentes consequências, consoante o valor da percentagem de massa perdida pelo varão. Caso o valor da corrosão seja inferior a 4 %, a força de ligação aumenta, contudo, a partir dos 12 % de corrosão, as nervuras dos varões começam a desintegrar-se, terminando assim a participação da aderência mecânica na ligação e reduzindo o valor da força de ligação [7]. O aparecimento de fendas tem tendência a surgir entre os 5 % e os 7 %. No entanto, apenas a partir do momento em que existe a perda de aderência mecânica, as fendas começam a ter um papel redutor na força de ligação [23, 17]. Assim sendo, a percentagem de perda de força de ligação ficará superior à percentagem de massa perdida do varão, devido à diminuição da área de contacto e respetiva aderência por atrito [50].

2.2 Mecanismos de Deterioração

Aquando de um projecto de construção de Engenharia Civil, as estruturas são concebidas para satisfazer diversos requisitos, tanto funcionais como estéticos. Desta forma, um dos requisitos estabelecidos para o projecto de estruturas, prende-se com a duração de vida útil desejada para a edificação. Caso os critérios e as devidas normas sejam correctamente aplicadas e caso não haja qualquer tipo de interferências externas, não previstas, o edifício deverá suportar o tempo de vida útil, sem que haja necessidade de custos imprevistos de manutenção [16].

A Figura 2.7, ilustra um fluxograma da relação entre o desempenho de um projecto e a sua durabilidade. Através desta figura é possível discernir as três causas de deterioração que existem num elemento de betão armado. Estas podem ser de origem física e química/biológica no caso do betão, no caso do aço a degradação pode dar-se com o desenvolvimento da corrosão. No entanto, estes processos apenas podem ocorrer se houver disponibilidade de um mecanismo de transporte em levar o agente perturbador para o interior do betão, excepção feita a alguns processos físicos, tais como a porosidade do betão, a fendilhação existente e a possível percolação de líquidos.

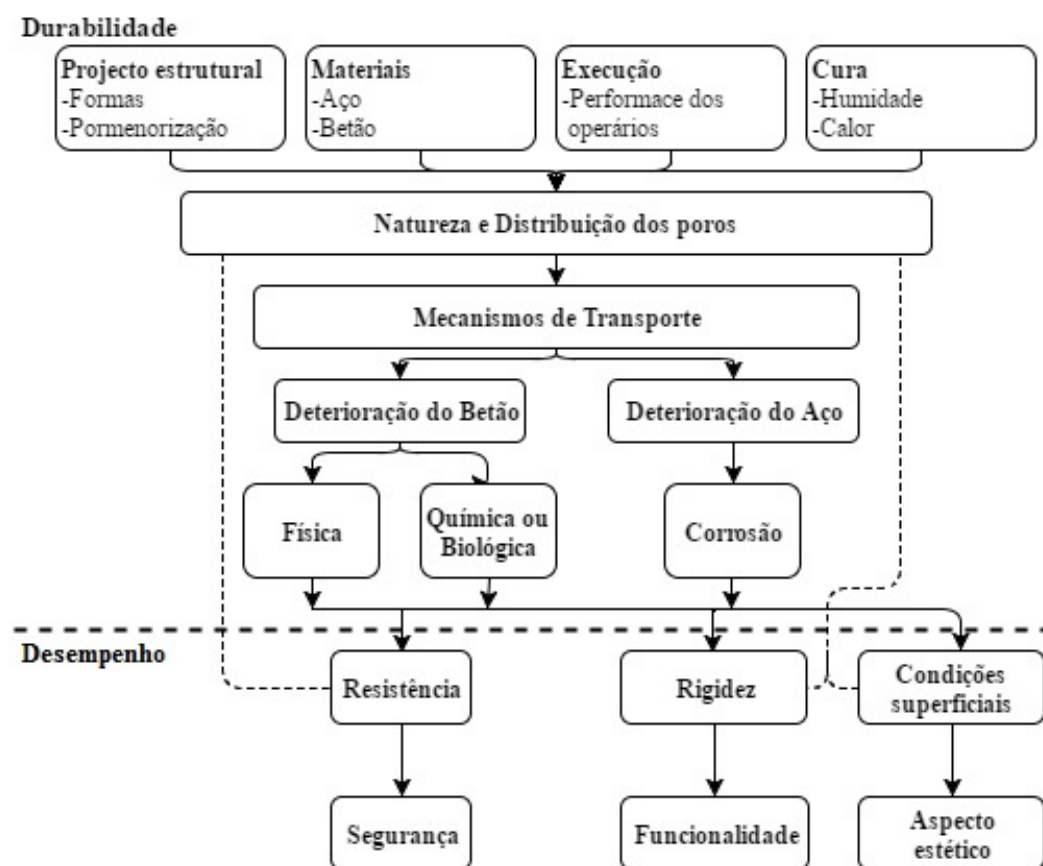


Figura 2.7: Fluxograma da relação entre os conceitos da durabilidade e da performace. (Adaptado de [12])

De maneira a realizar um controlo da degradação de uma estrutura com rigor, torna-se necessário ter conhecimento dos principais sinais que uma estrutura degradada pode apresentar, para além da corrosão [16, 12, 24]:

- Fendilhação - Ocorre quando a tensão aplicada no betão é maior do que a tensão resistente que este suporta. Pode ser causada por cargas ou deformações exteriores, pela expansão de materiais dentro do betão, como por exemplo, a corrosão e por movimentos gerados dentro do próprio betão;

- Delaminação ou Desagregação do betão - Ocorre quando uma camada de betão deixa de estar em contacto com os restantes elementos betonados, podendo tratar-se de uma desconexão local ou geral. As causas são idênticas às da fendilhação e geralmente precedidas pela mesma;
- Erosão - Surge quando partículas de betão são retiradas da superfície do elemento através da acção da água ou do vento;
- Infiltração - Ocorre quando um determinado líquido, geralmente água, penetra na superfície do betão, podendo criar desgaste físico ou reacções químicas no interior deste;
- Eflorescência - Ocorre quando existe uma reacção química no betão, criando cristais de sais no interior ou à superfície do betão;
- Deformação - Ocorre quando alguma zona da estrutura sofre um deslocamento ou uma rotação. Geralmente este tipo de ocorrências deve-se a assentamentos ou sobrecargas.

2.3 Métodos de Análise de Dano

A existência de alterações nas propriedades físicas e químicas das componentes que formam uma estrutura, podem levar a modificações de certos parâmetros dinâmicos e estáticos da mesma. Assim sendo, de maneira a garantir o correcto aproveitamento da função para o qual a estrutura se tornou necessária, torna-se indispensável garantir que estes parâmetros não sofrem alterações e que, caso estas ocorram, sejam registadas de maneira a fazer-se uma correcta reparação da zona danificada.

Os métodos de controlo e avaliação de dano de uma estrutura têm sido alvo de diversa investigação, de forma a obterem-se os ensaios adequados para cada análise e monitorização em diferentes situações. As técnicas empregues nos ensaios que se realizam nestes estudos podem ser de dois tipos, ou seja, técnicas de ensaio não destrutivas (TND) ou técnicas de ensaio destrutivas (TD). As primeiras, permitem à estrutura manter a sua função, sendo assim frequente aplicar estas técnicas em ensaios *in situ*. As TD, usualmente podem condicionar o tempo de vida útil de uma estrutura, mas são também geralmente mais conclusivas em termos de resultados da avaliação de dano, que as não destrutivas.

Em 1998, Doebling *et al.*(1998) [21] identificaram os métodos mais comuns na avaliação de dano, sendo estes divididos nas seguintes categorias: métodos acústicos ou ultrassónicos, métodos de campos magnéticos, radiografia, métodos de corrente eléctrica ou métodos termográficos. Contudo, em todos estes métodos, era necessário saber, *a priori*, a localização do dano, pois estes métodos só se encontram habilitados a confirmar e a quantificar a existência do dano. Desta maneira, foi necessário recorrer-se a outros parâmetros para estudar novas metodologias, que pudessem ser aplicadas na avaliação da presença de

dano numa estrutura e a sua localização.

Adams *et al.* (1975) [2] descobriram que caso haja alterações na rigidez de uma estrutura, esta alteração leva a mudanças nas propriedades dinâmicas desse elemento, tais como, modos de vibração, frequências próprias e amortecimento modal. É possível, através da alteração da rigidez dinâmica e do aumento do amortecimento, detectar dano num elemento. Segundo o mesmo autor, a participação do dano pode provocar perturbações distintas nos diferentes modos de vibração de uma estrutura, sendo isto causado pela intensidade, localização e o modo de ataque do dano na estrutura.

A medição das características dinâmicas de uma estrutura é um método aplicável na avaliação de dano da mesma. Segundo Adams *et al.* [1] a medição da frequência própria da estrutura pode ser realizada numa só direcção, sendo possível analisar a presença de dano. Estes autores conseguiram detectar dano equivalente à remoção de 1 % de secção, contudo, para uma melhor avaliação, obtendo a localização e a gravidade do dano, torna-se necessário um total registo dinâmico da estrutura.

O método proposto por Rytter em 1993, define uma classificação na identificação de dano através de quatro níveis [22]:

Nível 1 Determinação da existência de dano estrutural;

Nível 2 Nível 1 + determinação da localização do dano;

Nível 3 Nível 1 + determinação da quantidade de dano;

Nível 4 Previsão da restante vida útil da estrutura

Tendo em consideração os objectivos propostos neste trabalho, serão abordados de seguida algumas metodologias empregues nos três primeiros níveis de classificação de dano.

2.3.1 Métodos Baseados nas Alterações das Frequências Próprias

O método da variação das frequências próprias proporciona uma avaliação da existência de dano da estrutura de forma directa, comparando as frequências da estrutura sem dano e com dano. A frequência própria de um elemento, pode ser determinada através do quociente entre a rigidez (K) e a massa (m), conforme demonstrado na equação 2.6.

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.6)$$

Caso ocorra alguma alteração física na estrutura, o valor da rigidez será alterado, sendo alterado também o valor da frequência própria da estrutura e a variação da frequência própria vai ser quadrática em relação à variação da rigidez.

O método de avaliação de dano através da variação das frequências apenas pode ser confiável se existir no mínimo uma variação de 5 % na frequência própria da estrutura, pois um resultado menor que este pode resultar devido a alterações climáticas que influenciem a rigidez estrutural [5]. Assim sendo, de maneira a aplicar este método a variações de frequência inferiores a 5 % torna-se necessário utilizar aparelhos e sistemas de medição de vibração muito precisos, de maneira a ter-se uma correcta avaliação do dano.

A localização do dano pode ser outro dos factores que influencia a variação da frequência. Caso o dano na estrutura esteja localizado perto de uma região onde as tensões existentes sejam elevadas, pode levar a alterações de frequência de cerca de 15 % [29].

Foram realizados diversos estudos sobre este método, com aplicação em estruturas reais, durante as décadas de 1970 e 1980, para controlo de dano em estruturas *offshore*. Contudo, a maior parte destes ensaios teve resultados pouco satisfatórios, tendo em consideração a avaliação de dano esperada [21].

A aplicação desta metodologia é mais eficiente quando realizada em ambientes controlados, pois factores climáticos, vibração de maquinaria e as marés, que aumentam a massa da estrutura, dificultam uma correcta análise de dano na estrutura. Considera-se no entanto um método com alguma eficácia na detecção de dano de forma expedita [43].

2.3.2 Métodos Baseados nas Alterações dos Modos de Vibração

Os métodos baseados na avaliação dos modos de vibração surgiram de maneira a tornar mais simples a avaliação de dano e a respectiva localização na estrutura. Uma das vantagens em relação ao método de variação das frequências é a maior exactidão da avaliação de dano, quando este é localizado.

Podem existir algumas desvantagens na aplicação destes métodos. A primeira deve-se ao facto de se tratar de um dano com uma ocorrência local, não alterando, de maneira significativa, a forma dos primeiros modos, que são geralmente produzidos através de medições de vários transdutores aplicados numa estrutura e a segunda preocupação prende-se com o ruído que pode existir aquando da recolha de dados para formar os modos de vibração, pois este ruído pode ser proveniente das vibrações, a uma frequência constante, de máquinas ou outros elementos existentes na estrutura. Por fim, torna-se necessário ter em atenção aos transdutores escolhidos para a medição dos valores da estrutura, assim como a sua localização, pois podem influenciar as deformadas dos modos [31].

O método das alterações dos modos de vibração tem, essencialmente, como particularidade na análise de dano, as alterações que possam ocorrer em

determinados modos de vibração. Definindo-se um certo modo de vibração, considera-se que ocorreu dano na estrutura, caso haja uma diferença no modo analisado em comparação com o modo definido. A equação 2.7 traduz esta diferença [45].

$$\Delta\phi_{i,j} = |\phi_{i,j}^* - \phi_{i,j}| \quad (2.7)$$

No qual:

$\Delta\phi_{i,j}$ é a variação da função forma entre a estrutura danificada e a mesma sem dano, no local i , para o modo de vibração j ;

$\phi_{i,j}^*$ representa a função forma da estrutura sem dano, no local i , para o modo de vibração j ;

$\phi_{i,j}$ representa a função forma da estrutura danificada, no local i , para o modo de vibração j .

No entanto, existem outras formas de aplicar o método da variação dos modos. Em 1984, Walter West descobriu um dos primeiros sistemas de localização de dano, tendo por princípio os modos de vibração, utilizando o *MAC (Modal Assurance Criterion)*, que consiste num indicador estatístico idealizado por Allemang e Brown. Este índice varia entre 0 e 1, sendo 1 a correlação perfeita entre os dois modos e 0 significa que não há relação entre os modos. Esta metodologia permite a comparação global entre os valores da estrutura, com e sem dano [21].

Em 1988, Lieven e Ewins definiram um novo critério de análise através dos modos de vibração, partindo do índice *MAC* e designado *COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion)*. Ao contrário do *MAC*, que avalia a estrutura de forma global, este critério utiliza uma propriedade local e possibilita uma concordância local entre os variados modos da estrutura [21]. Este método utiliza um critério idêntico ao *MAC*, com os valores a variarem entre 0 e 1, sendo 0, a completa falta de relação entre os modos e 1 uma uniformidade total destes.

2.3.3 Métodos Baseados em Alterações nas Curvaturas

Ao realizarem-se as derivadas da função de forma dos modos de vibração, é possível obter outros métodos de localizar e avaliar a presença de dano numa estrutura, entre essas derivadas, surge a curvatura dos modos de vibração.

Utilizando a Figura 2.8 torna-se possível descrever a definição de curvatura. Esta figura representa uma viga sujeita à flexão e na qual se encontra aplicada a hipótese dos pequenos deslocamentos e a hipótese de Bernoulli, que enuncia que as fibras lineares e perpendiculares ao eixo, continuam dessa forma após a flexão da viga. Sendo possível calcular a deformação axial desta viga, através da geometria do problema, resultando na equação 2.8.

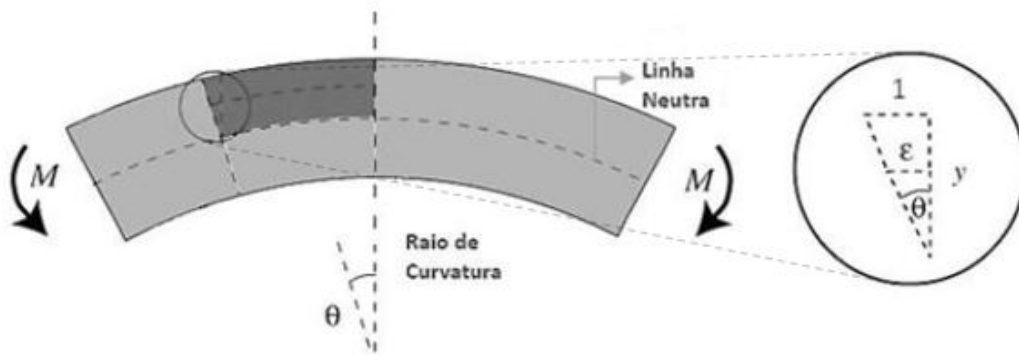


Figura 2.8: Relações decorrentes de um elemento tipo, em flexão. (Adaptado de [29])

$$\varepsilon = \frac{y}{R} \quad (2.8)$$

Na qual:

ε é a deformação axial da viga;

y é a distância da linha neutra a uma fibra da viga;

R é o raio da curvatura.

De forma similar, torna-se visível que o ângulo formado pela flexão, pode ser calculado a partir da largura unitária e a partir do raio de curvatura. Assim sendo, a curvatura é definida por χ e encontra-se representada na equação 2.9 [29].

$$\chi = \phi'' = \frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{1}{R} \quad (2.9)$$

Pandey *et al.* [37] demonstraram, em 1991, através das diferenças absolutas entre as curvaturas de uma estrutura modelada, num programa de elementos finitos, a possibilidade de saber a localização do dano numa estrutura com bastante precisão, através das curvaturas. Os elementos estruturais, como vigas e placas, têm como esforço principal o momento flector, sendo o momento flector uma grandeza proporcional à curvatura, conforme demonstrado na equação 2.10 [19], a curvatura de uma viga. Caso ocorra dano num elemento estrutural, este dano vai alterar o valor da rigidez de flexão existente, alterando assim o valor da curvatura desse elemento.

$$\chi = -\frac{M}{EI} \quad (2.10)$$

Sendo:

ϕ'' a curvatura do modo escolhido;
 M o momento flector do elemento;
 E o módulo de elasticidade do material (módulo de Young);
 I o momento de inércia da secção transversal.

Através da equação 2.9 é visível que a curvatura se trata da segunda derivada do modo de vibração da estrutura. No entanto, para o cálculo da função da curvatura ser directo é necessário conhecer-se a função que representa o modo de vibração a derivar. Contudo, caso se tenham obtido os valores dos deslocamentos modais dos pontos a analisar, pode aplicar-se um operador de diferenças centradas, provenientes do modelo de elementos finitos (MEF), para calcular a curvatura.

O ponto onde a diferença absoluta entre as curvaturas modais for máximo, é o local onde o dano teve maior impacto na estrutura.

Um método semelhante ao de Pandey surgiu em 1992, por Stubbs *et al.* [48]. Neste método, a comparação era realizada tendo por base a energia de deformação em cada grau de liberdade. Caso ocorresse uma diminuição de energia assinalável, o método previa a existência de dano nesse local.

Chance *et al.* descobriram que obter os valores da curvatura através de calculo numérico, podia levar a erros consideráveis, tendo recomendado a utilização de medições das deformações *in situ* para o calculo da curvatura, o que leva a uma melhoria dos resultados [21, 15].

2.3.4 Métodos Baseados nas Variações da Matriz Flexibilidade

As metodologias baseadas em matrizes de flexibilidades são outro meio de analisar a presença de dano em estruturas. Sendo a matriz de flexibilidade o inverso da matriz de rigidez, esta relaciona também a força com os deslocamentos. Desta maneira, na presença de dano, a flexibilidade de uma estrutura tem tendência a aumentar, da mesma maneira que a rigidez da estrutura é afectada pelo dano, diminuindo a rigidez [53]. Estes métodos comparam a matriz de flexibilidade da estrutura sem dano, com a matriz de flexibilidade da estrutura com dano, sendo que ambas são geradas a partir dos modos de vibração, para avaliar a existência e o local de dano numa estrutura.

As equações 2.11 e 2.12 representam o método mais simples da aplicação através das matrizes de flexibilidade [53]. Na primeira equação encontra-se a construção da matriz flexibilidade de uma estrutura. Na segunda equação, está representada o método de avaliação de dano, através da diferença entre as matrizes flexibilidade com e sem dano.

$$[F] = [\Phi][\Omega]^{-1}[\Phi]^T \quad (2.11)$$

Na qual:

$[F]$ é a matriz de flexibilidade;

$[\Phi]$ é a matriz dos modos de vibração, normalizada com a matriz massa generalizada;

$[\Omega]$ é a matriz diagonal do quadrado das frequências próprias, $[\Omega] = \text{diag}(w_i^2)$.

$$[\Delta F] = [F] - [F^*] \quad (2.12)$$

Sendo:

$[\Delta F]$ a matriz da diferença entre as flexibilidades;

$[F]$ a matriz de flexibilidade da estrutura sem dano;

$[F^*]$ a matriz de flexibilidade da estrutura com possível dano;

Foi demonstrado, por Doebling *et al.* em 1995 [20], outro método baseado em alterações da flexibilidade. Nesta metodologia, o conceito de flexibilidade residual é referido, sendo calculada uma nova matriz que contém todos os modos de vibração. Através desta metodologia, torna-se possível calcular a matriz de flexibilidade estática com uma maior exactidão, tendo o autor comprovado que as estimativas de diagnóstico de dano foram mais precisas [29, 21].

Capítulo 3

Métodos Experimentais

Neste capítulo será apresentada toda a informação relevante para a realização dos ensaios do presente trabalho. A primeira secção, será uma descrição dos materiais utilizados nos modelos ensaiados e a metodologia implementada no ensaio de corrosão acelerada será explicada na secção 2 deste capítulo. Por fim, na última secção, será abordada a metodologia empregue na realização dos ensaios experimentais, para determinação das características dinâmicas dos modelos e respectivas capacidades de carga.

3.1 Materiais

Os ensaios foram realizados tendo por base vigas pré-fabricadas de betão armado, pré-esforçado longitudinalmente com recurso a um fio de aço aderente de alta resistência pré-tensionado durante a produção. Não foram utilizadas armaduras ordinárias longitudinais e transversais. Este tipo de elemento é muito utilizado na construção de pavimentos estruturais aligeirados de moradias e de parques de estacionamento de vãos reduzidos.

As vigas foram fabricadas pela empresa *Presdouro* e a ficha técnica das vigas, fornecida por esta empresa, encontra-se no anexo B.

O fio de aço aderente utilizado possui a designação Y 1770 C 5.0 e tem um módulo de Young de 205 ± 10 GPa [11]. Este fio de aço possui um diâmetro de aproximadamente 5 mm, sendo assim, a área de aço pré-esforçado possui cerca de $19,6 \text{ mm}^2$. Para a aplicação do pré-esforço, a tensão durante o processo, foi de aproximadamente 1290 MPa.

O betão utilizado para a fabricação das vigas foi de classe C 30/37.

As dimensões da secção da viga, assim como da posição da armadura pré-esforçada encontram-se representadas na Figura 3.1 e o comprimento com o qual as vigas foram fabricadas foi de 1,5 m.

O elemento estrutural estudado são vigas fabricadas com pré-esforço por

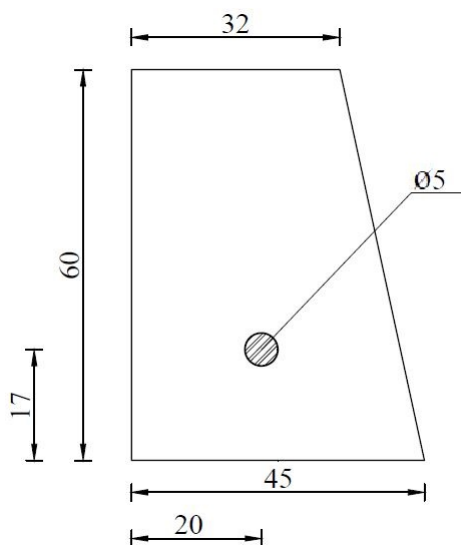


Figura 3.1: Geometria da secção das vigas ensaiadas, em mm.

pré-tensão com excentricidade, que apresentam uma normal contra-flecha, cujos valores medidos variavam nos diferentes modelos entre os 7,25 mm e 8,5 mm.

3.2 Ensaio Corrosão Acelerada

O sistema de introdução de corrosão escolhido foi o sistema de pilha eletroquímica, através de um método eletrolítico. Este sistema, como já foi referido no capítulo 2, consiste na diferença de potenciais entre dois elétrodos. No entanto, no método de pilha eletrolítica, esta diferença de potenciais é imposta através de uma fonte de energia externa, que consistiu numa fonte de alimentação elétrica com controlo da intensidade de corrente ou da diferença de potencial entre os dois polos. Neste trabalho, o controlo escolhido foi o de intensidade de corrente, tendo em atenção que o valor se mantivesse por volta de 0,27 Amp, conforme é visível na figura 3.2, o que se traduz numa corrente eléctrica aplicada ao fio de aço, de aproximadamente 1,2 mAmp/cm². Este valor de intensidade de corrente eléctrica foi escolhido do intervalo de valores habituais na técnica de impressão de corrente [13] e após vários ensaios de optimização do método, tendo em consideração os objectivos do trabalho. É importante referir que a introdução de dano nos modelos decorreu num espaço fechado, à temperatura ambiente. Esta experiência foi realizada no Laboratório de estruturas dinâmicas, no Departamento de Engenharia Civil, pertencente à Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Na Tabela 3.1, encontra-se descrita a designação dos modelos ensaiados, assim como os valores da percentagem de corrosão teórica pretendida para cada modelo, isto é, a percentagem de massa perdida no fio de aço, contido em cada modelo ensaiado devido à corrosão introduzida. É referir que os dois primeiros



Figura 3.2: Fonte de alimentação utilizada.

modelos, VR1 e VR2, foram considerados de referência e, portanto, não foram sujeitos ao processo de corrosão acelerada.

Tabela 3.1: Designação e percentagem da corrosão pretendida em cada modelo

Modelo	% Corrosão Pretendida
VR1	0 %-Viga referência 1
VR2	0 %-Viga referência 2
V1	2,5 %
V2	5 %
V3	7,5 %
V4	10 %
V5	15 %
V6	20 %
V7	25 %
V8	30 %
V9.1	40 %
V9.2	40 %

A metodologia descrita de seguida, foi a preparação empregue em todos os modelos para a introdução de dano nos mesmos. Este método foi o designado após a realização de vários modelos de estudo e optimização do processo da técnica de corrosão acelerada, sendo a única variável entre os vários modelos o intervalo de tempo de impressão de corrosão acelerada.

Para a preparação do trabalho de introdução de dano foi necessário retirar o betão de recobrimento num comprimento de 3 cm numa das extremidades da

viga, de maneira a que o fio de aço ficasse exposto. Este passo foi necessário para garantir uma correcta ligação do fio de aço à fonte de alimentação, que é elaborada colocando o fio de alimentação daí proveniente em contacto com o fio de aço da viga, sendo toda esta ligação impermeabilizada através de um tubo de borracha injectado com silicone, conforme demonstrado na Figura 3.3. Desta maneira, é garantido que a zona da ligação não sofre oxidação.

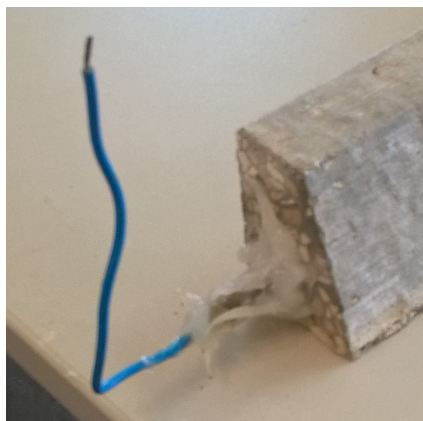


Figura 3.3: Ligação entre a fonte de alimentação e os modelos

Após a preparação e colocação dos instrumentos de medida, descritos posteriormente no presente documento, a viga é colocada no tanque onde decorrerá o processo de corrosão acelerada. A viga é colocada na base do tanque, submersa até uma altura de 4 cm numa solução 5 % de cloreto de sódio. Cada modelo esteve imerso entre 12 a 14 horas antes de impressão de corrente, de forma a garantir que a solução penetrasse no betão até à zona do fio de aço, garantindo-se assim que o electrólito alcançasse o ânodo.

De forma a iniciar-se o processo de impressão de corrosão, o modelo é colocado em cima de dois apoios simples, colocados nas extremidades, ficando a cota da solução líquida tangente ao fio de aço na extremidade.

Após a colocação e ligação do cátodo à fonte de alimentação e após a ligação do ânodo à mesma fonte, iniciou-se o processo de corrosão do fio de aço. O cátodo utilizado consiste num varão de aço inoxidável colocado ao longo da viga. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram uma representação esquemática e uma fotografia do modelo utilizado.

Com base na lei de Faraday, apresentada na equação 2.3, as variáveis que se controlam são a intensidade de corrente aplicada, I_{app} e o tempo, T , de forma a obterem-se os valores de dano pretendidos e anteriormente referidos na Tabela 3.1. Como já foi referido, a intensidade que se aplicou está definida à priori, sendo aproximadamente $1,2 \text{ mAmp/cm}^2$. Este valor resultou de uma optimização tendo em vista uma velocidade de corrosão suficientemente alta que permitisse a execução atempada do trabalho experimental, mas que ao mesmo

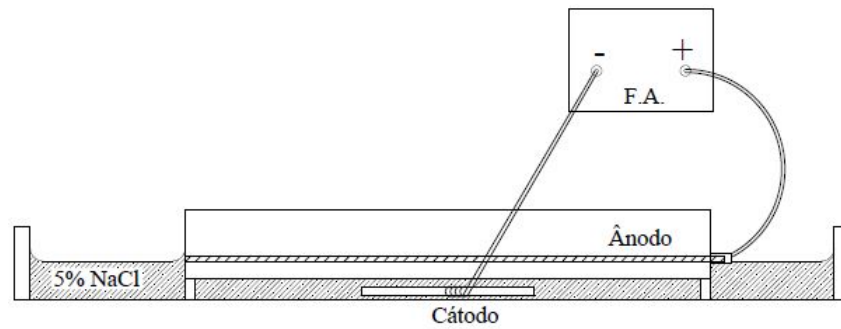


Figura 3.4: Esquema da pilha eletrolítica do modelo de dano.



Figura 3.5: Fotografia do modelo V1 sem dano na qual é visível a ligação do ânodo e do cátodo.

tempo causasse danos compatíveis com aqueles decorrentes do processo de corrosão natural. Mais se refere que valores desta ordem de grandeza tem sido utilizados em diversos estudos já publicados [10, 13].

A variável tempo é o único elemento da equação 2.3 que varia de modelo para modelo, assim sendo, tornou-se necessário saber durante quanto tempo cada modelo, estaria ligado à corrente eléctrica. Tendo em consideração a percentagem de dano pretendida, torna-se possível saber qual a variação de massa que cada modelo necessita e consequentemente a massa final que o fio de aço apresenta após a corrosão. As equações 3.1 e 3.2 representam estes cálculos descritos.

$$X_p = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$w_f = w_i \cdot \left(\frac{X_p}{100} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Sendo que,

X_p é a percentagem de massa perdida;

w_i é a massa inicial de um troço do fio de aço;

w_f é a massa final de um troço do fio de aço.

Sabendo a massa final e inicial do modelo e utilizando a equação 2.4 é possível calcular a M_{ac} , a massa real de corrosão obtida, medida em g/cm². Igualando a massa de corrosão teórica, M_{th} , com a massa de corrosão obtida, M_{ac} e colocando a equação 2.3 em ordem a T torna-se possível obter o tempo necessário para alcançar a corrosão pretendida, como está descrito pela equação adiante.

$$T = \frac{M_{th} \cdot F}{W \cdot I_{app}} \quad (3.3)$$

Na qual,

T é o tempo de duração da imposição de dano, s;

M_{th} é a massa de corrosão teórica perdida no modelo, g;

F é a constante de Faraday e o seu valor é 96487 Amp/s

W é a massa equivalente, para o caso do aço, este valor é de 27,925 g;

I_{app} é a intensidade de corrente elétrica aplicada, medida em Amp/cm².

Realizados estes passos para todos os modelos, obtém-se o tempo que cada viga necessita para obter o dano desejado e os tempos obtidos são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Tempo necessário para cada modelo obter o dano necessário

Modelo	V1	V2	V3	V4	V5
Tempo (h)	20,0	40,0	60,0	80,0	119,9
Modelo	V6	V7	V8	V9.1	V9.2
Tempo (h)	159,9	199,9	239,9	319,8	319,8

Durante a introdução de dano, as únicas preocupações necessárias prendem-se com a manutenção do nível de água constante e com o valor da intensidade de corrente para que se mantenha em níveis próximos do valor definido.

Para definir qual o valor real de corrosão existente, torna-se necessário retirar os fios de aço das vigas. Após os fios serem retirados do interior das vigas é necessário retirar o excedente aço que fica aderente ao fio, apesar de não fazer parte deste, pois já sofreu o processo de oxidação. Para tal, a cada fio retirou-se o comprimento da ligação à fonte de alimentação, pois este não sofre corrosão. Em seguida o fio de aço é cortado em quatro troços de 32 cm e um troço de 18 cm correspondendo à zona central do modelo. Este passo é necessário para o ensaio de tracção, que será explicado na secção 3.3. A designação definida para os troços cortados encontra-se representada na Figura 3.6.

De maneira a retirar o aço corroído que se encontra aderente ao fio de aço, foi utilizado um desoxidante com acção passivante, aplicado abundantemente num período de 30 minutos. Foi colocado, em seguida, num recipiente com água

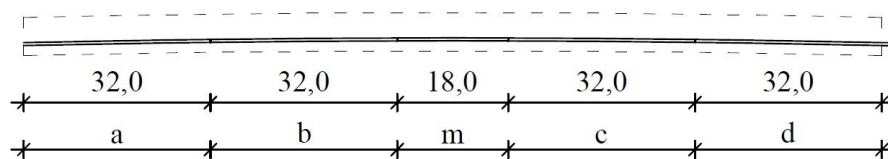


Figura 3.6: Esquema e designação dos cortes realizados no fio de aço, em cm.

doce e esfregado com uma escova de palha de aço até o efeito da corrosão desaparecer. A Figura 3.7 mostra um fio cortado nos respectivos cinco troços durante o processo de banho e é visível o efeito da desincrustação dos resíduos de aço corroídos, causados pelo efeito desoxidante.



Figura 3.7: Fotografia de um fio de aço cortado em troços durante o processo de desoxidação.

Tendo finalizado todo o processo de limpeza, os troços dos fios de aço ficam protegidos por uma película passivante. Os últimos passos na metodologia empregue no ensaio da corrosão acelerada, consistem na medição do comprimento do troço e a pesagem do mesmo e através destes valores torna-se possível ter conhecimento da verdadeira percentagem de corrosão aplicada em cada modelo.

3.3 Metodologias dos Ensaio Experimentais

Na presente secção serão referidas as metodologias utilizadas para a avaliação de diferentes características estudadas nos ensaios não destrutivos e nos ensaios destrutivos. As propriedades estudadas nos ensaios não destrutivos são a

deformada, a frequência e os modos, enquanto que propriedades estudadas nos ensaios destrutivos são a carga de rotura, o momento de rotura e a carga de tracção dos fios de aço para os diferentes níveis de dano.

Os ensaios não destrutivos foram realizados durante a imposição de dano, logo, foram também realizados no Laboratório de Dinâmica de Estruturas do Departamento de Civil da FCT. O ensaio de carga última foi realizado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Civil da FCT. Por fim, o ensaio de tracção foi realizado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

3.3.1 Parâmetros Dinâmicos e Deformada

No processo descrito na secção 3.2, um dos passos realizados no ensaio é a fase em que o elemento estrutural está parcialmente submerso, no tanque com a solução de cloreto de sódio, e está a ser introduzida a corrosão definida. No entanto, durante o período de tempo definido para cada modelo, foram realizadas em paralelo análises à viga, para obtenção de dados.

A medição da deformada a meio vão, foi realizada através de um sensor fotoelétrico da marca *Baumer*, sendo o modelo utilizado o OADM 20. Este sensor realiza as medições através de um laser de infravermelhos, sendo esta informação transformada em voltagem que é lida e convertida para um sistema de medição métrico através do programa *LabVIEW*. O sensor laser foi implementado num pórtico associado ao tanque, onde a viga é colocada de maneira a que o meio vão, previamente marcado no modelo, ficasse colocado sob a marca do laser.

Foi utilizado o programa *LabView* para elaborar as medições e a recolha dos dados, cujas análises foram programadas no sistema para que ocorressem de 2 em 2 horas e que a recolha e tratamento de dados fosse realizada durante 15 minutos seguidos, em cada análise. Em cada análise são recolhidas 22530 entradas de dados, para a avaliação da deformada.

A primeira análise é realizada sem a viga estar em contacto com a solução de cloreto de sódio e durante o ensaio as análises são realizadas com a calendarização descrita anteriormente. No final da introdução de dano são realizadas mais duas análises, uma com a viga em contacto com a água salgada e outra em que a água é retirada até deixar de estar em contacto com a viga. Em todas as análises realizadas, as acções presentes eram o peso próprio e a excitação natural.

Para além da medição da deformada, durante a introdução de dano na viga, foram também realizadas medições das acelerações instantâneas através de oito acelerómetros colocados na viga, cuja marca destes é *PCB*. A aquisição das leituras dos acelerómetros é realizada com uma frequência de 500 Hz. Os modelos dos acelerómetros utilizados para a obtenção das acelerações encontram-se esquematizados na Tabela 3.3 e representados na figura 3.8 e as

suas posições no modelo encontram-se ilustradas na Figura 3.9, onde também se mostra a posição do laser, representado pela designação L1. Optou-se pela colocação dos sensores tendo em consideração que os quatro sensores com maior sensibilidade, os modelos 393B04, ficariam colocados nas posições com maiores valores de aceleração.

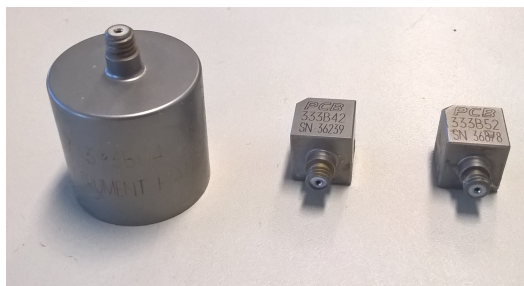


Figura 3.8: Acelerómetros utilizados, da esquerda para a direita: 393B04, 333B42 e o 333B52.

Tabela 3.3: Modelos dos acelerómetros utilizados

Sensor	A1	A2	A3	A4
Modelo	333B42	333B52	393B04	393B04
Sensor	A5	A6	A7	A8
Modelo	393B04	393B04	333B52	333B42

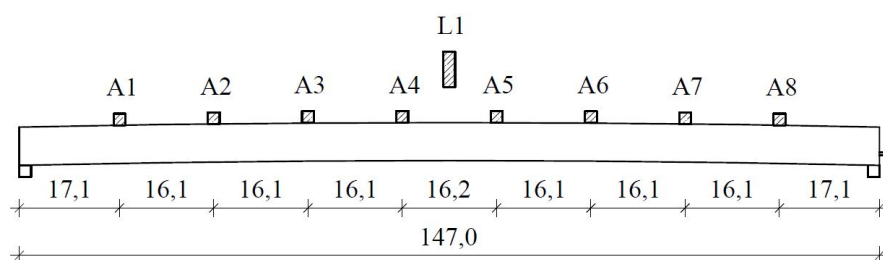


Figura 3.9: Representação da colocação dos acelerómetros, em cm.

Na caracterização do valor da frequência e dos modos de vibração dos modelos utilizou-se o programa *Artemis*. O modelo efectuado para a análise dinâmica da viga está ilustrado na Figura 3.10.

Na página de preparação de dados para a análise, escolheu-se o valor do novo intervalo de frequência que seria entre 0 e 250 Hz, metade do valor da frequência de aquisição de dados. É necessário seleccionar o algoritmo do método de identificação estocástica do subespaço que se pretende que faça a estimativa do modelo. No caso do presente trabalho, os algoritmos escolhidos foram o *CVA* (*Canonical Variate Analysis*) e o *UPC* (*Unweighted Principal Componentenents*).

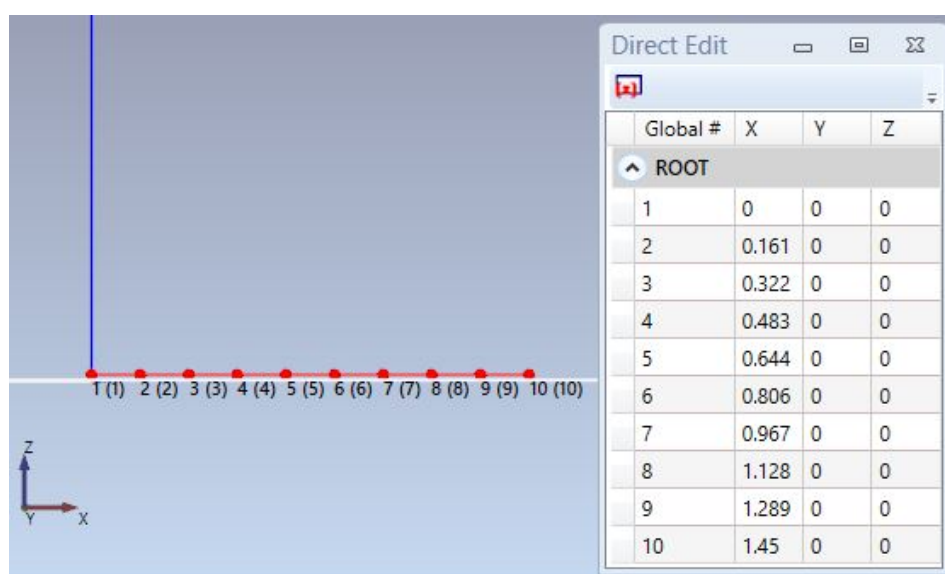


Figura 3.10: Definição da geometria do modelo no *software Artemis*.

Optou-se por estes dois métodos pois apresentam resultados muito semelhantes. Segundo Jorge Rodrigues [42], estes dois modelos de estimativa tendem a obter, através de metodologias diferentes, resultados de estimativa bastante aproximados.

Tendo realizado a análise através do programa *Artemis*, foi necessário seleccionar, entre os modos estimados, o modo de vibração, para efectuar a comparação com os diferentes níveis de dano. Optou-se pelo primeiro modo de vibração de uma viga simplesmente apoiada que, como é sabido, as funções forma dos modos de vibração de uma viga simplesmente apoiada são representadas por uma função sinusoidal $\phi(x) = \sin(j\pi x/L)$, sendo j o modo desejado e L o comprimento da viga. A representação gráfica desta função encontra-se representada na Figura 3.11.

Com o surgimento de dano na viga e se a degradação não for uniforme ao longo do modelo, podem começar a ocorrer alterações nos modos de vibração [29]. Desta maneira, o modo escolhido para comparação, de cada análise, foi o que apresentasse uma maior similaridade com o primeiro modo para uma viga simplesmente apoiada. Cada modo de vibração obtido é apenas representado através da função forma nos nós definidos, aquando da definição geométrica do modelo. Isto é, os dois pontos de extremidade e os oito pontos onde estavam colocados os acelerómetros, sendo os nós da função forma ligados através de segmentos de recta. Através da aplicação da equação 2.7, torna-se possível realizar uma comparação entre os modos da viga com dano e sem dano.

A cada modo de vibração estimado está associado um valor de frequência própria. Assim sendo, elaborando estes passos para todas as análises realizadas por modelo, torna-se possível fazer o registo dos valores das frequências e a sua

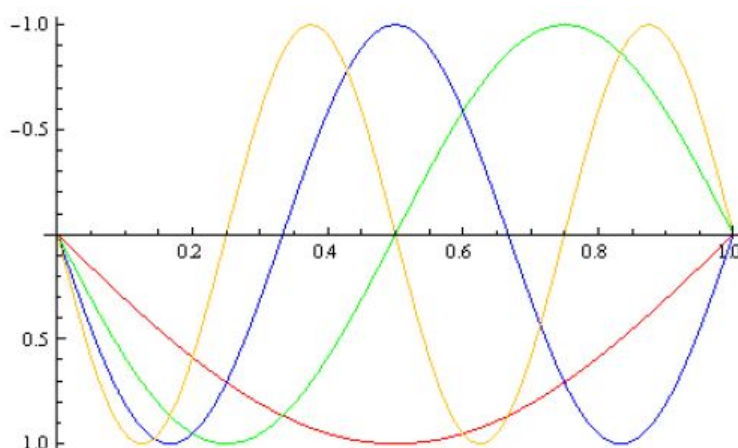


Figura 3.11: Representação gráfica dos quatro primeiros modos de vibração, por ordem crescente: vermelho, verde, azul e amarelo. (Retirado de [41])

respectiva evolução ao longo da imposição do dano em cada modelo.

Tendo sido referido no capítulo 2, um dos modos de avaliação de dano num elemento estrutural é visível através das diferenças absolutas da curvatura. Sendo que a curvatura é a segunda derivada da deformada, torna-se possível, após a obtenção dos modos, fazer o cálculo da função da curvatura em cada análise. Através dos modos de vibração obtiveram-se os deslocamentos modais dos pontos onde estavam colocados os acelerómetros. Assim sendo, o cálculo da curvatura realizou-se através destes valores e para os respectivos pontos. De maneira a obter-se os valores da curvatura, utilizou-se um operador baseado nas diferenças centradas, conforme esquematizado na Figura 3.12 e definido na equação 3.4.

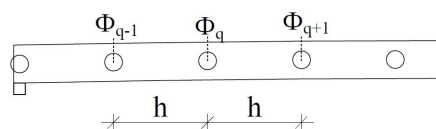


Figura 3.12: Modelo das diferenças finitas centradas. (Adaptado de [29])

$$\phi_q'' = \frac{\phi_{q-1} - 2\phi_q + \phi_{q+1}}{h^2} \quad (3.4)$$

Na qual,

- ϕ_q'' é o valor da curvatura no ponto q ;
- ϕ_{q-1} é o valor do deslocamento no ponto $q - 1$;
- ϕ_q é o valor do deslocamento no ponto q ;
- ϕ_{q+1} é o valor do deslocamento no ponto $q + 1$;
- h é o comprimento entre dois pontos adjacentes.

Em cada uma das extremidades existe a falta de um ponto, de forma a conseguir utilizar o operador 3.4. De maneira a conseguir calcular-se a curvatura nestes dois pontos, é necessário utilizar as condições de fronteira existentes. Sabendo que se trata de uma viga simplesmente apoiada, no ponto em cima do apoio, o deslocamento é nulo. Contudo, pode existir rotação neste nó. Uma vez que existe rotação nesse ponto, o momento flector terá de ser nulo e, desta maneira, pode concluir-se que a deformada do ponto fora da viga é simétrica à deformada do ponto adjacente ao ponto sobre o apoio. Assim sendo, obteve-se a equação 3.5.

$$\phi_{q+1} = -\phi_{q-1} \quad (3.5)$$

Tendo em conta a equação 3.5 e aplicando esta igualdade na equação 3.4 obteve-se a equação 3.6, que permite calcular o valor da curvatura nos pontos de extremidade, onde se encontram os apoios.

$$\phi_q'' = \frac{-2\phi_q}{h^2} \quad (3.6)$$

Possuindo os valores das curvaturas torna-se possível fazer a diferença absoluta das mesmas, sendo que as diferenças são feitas entre o modelo sem dano e ao longo da imposição do dano na viga. Uma das metodologias descritas capítulo 2, sobre a avaliação de dano através da curvatura, encontra-se representada na equação 3.7.

$$\Delta\phi_q'' = |\phi_q''^* - \phi_{q,X_p}''| \quad (3.7)$$

Sendo,

$\Delta\phi_q''$ é o valor da diferença absoluta da curvatura no ponto q ;

$\phi_q''^*$ é a curvatura do modelo inicial no ponto q ;

ϕ_{q,X_p}'' é a curvatura de uma análise, com X_p de corrosão, no ponto q .

De maneira a poder realizar a avaliação de dano através das diferenças absolutas da curvatura, é necessário fazer a comparação através de análises nas mesmas condições. Isto é, a análise final realizada sem contacto com a solução de cloreto de sódio é comparada com a análise inicial também sem a água salgada. Da mesma forma, as análises realizadas após a colocação da solução de cloreto de sódio apenas são comparadas entre a inicial sem dano e as restantes.

3.3.2 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos são ensaios para verificar quais as acções e respectivos valores nos quais o elemento estrutural, a estudar, colapsa. No âmbito deste trabalho foram realizados dois ensaios destrutivos para o actual documento,

designadamente a caracterização da carga última na viga e o ensaio de tracção nos fios de aço constituintes dos modelos.

O modelo utilizado para o ensaio da carga última optimizou-se após vários ensaios com vigas de teste, com e sem dano. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga P até à rotura dos diferentes modelos, através do método dos três pontos, isto é, a viga encontra-se simplesmente apoiada e é-lhe aplicada uma carga pontual a meio vão.

O sistema de carga última utiliza um modo de viga simplesmente apoiada, cujos dois apoios utilizados foram distintos. De um lado foi colocado um apoio com um rolamento móvel e na extremidade oposta colocou-se um apoio fixo que apenas permitia rotações. Desta maneira, a estrutura torna-se isostática. Os apoios encontravam-se a uma distância de 1,20 m, sendo a carga P aplicada a meio deste comprimento. Uma vez que os modelos apresentavam um comprimento de 1,47 m foram preparados de maneira a que o meio vão da viga ficasse no ponto de aplicação de carga, ficando 0,735 m para cada lado deste ponto. Visto que a distância de meio vão até aos apoios era de 0,6 m, as marcações para os apoios distavam 0,135 m da extremidade. A Figura 3.13 representa a geometria do ensaio, assim como a generalidade do equipamento utilizado.

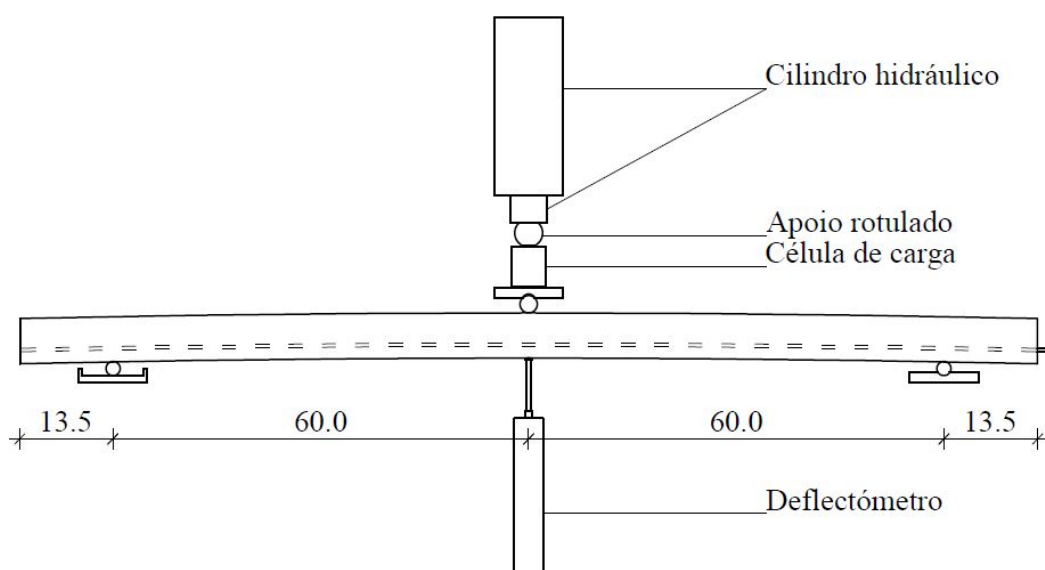


Figura 3.13: Esquema da aplicação da carga, em cm.

A aplicação da carga realizou-se através de um cilindro hidráulico, *Enerpac* RCH 206 e deslocamento máximo de 155 mm, montado num pórtico de reacção. O ensaio foi efectuado por imposição de deslocamento e foi incluído um apoio rotulado entre o cilindro e a célula de carga. Utilizou-se uma célula de carga da *Tokyo Sokki Kenkyujo* CLC-50KNA com capacidade de leitura até aos 50 kN.

Sob a célula de carga foi ainda colocada uma placa de aço com um encaixe cilíndrico, onde foi colocado um cilindro de forma a garantir que a carga colocada era pontual. Na face inferior da viga foi implementado um sistema de leitura da deformada, que consiste na colocação de um deflectómetro em contacto com a face inferior da viga. O deflectómetro utilizado foi o modelo CDP 100 da *Tokyo Sokki Kenkyujo* com um curso de 100 mm. A fotografia apresentada na Figura 3.14 ilustra um dos modelos preparados para a realização do ensaio.

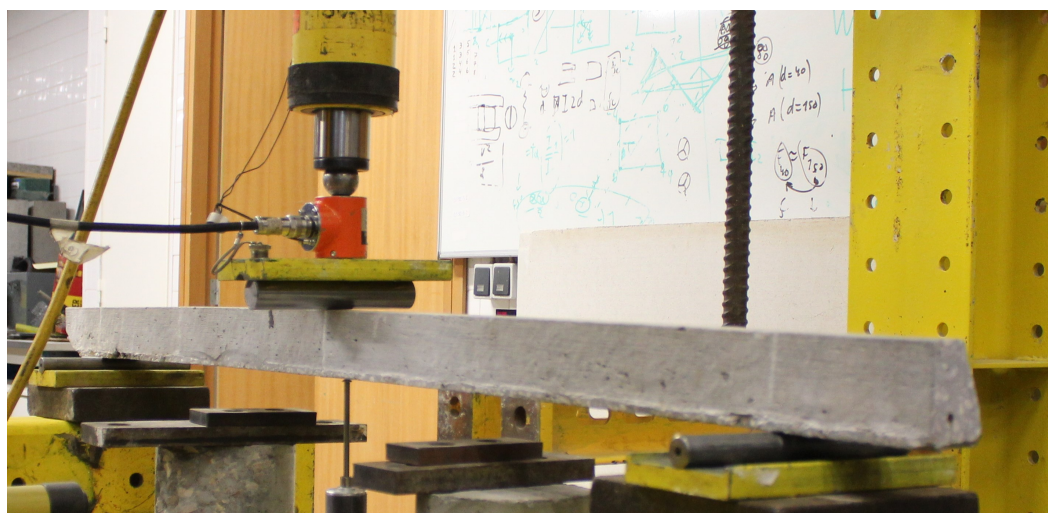


Figura 3.14: Exemplo de um modelo preparado para o ensaio de carga última.

A célula de carga, assim como o deflectómetro, foram ligados a um equipamento para aquisição de dados, do modelo Spider 8, da *HBM*. O software *Catman*, da *HBM*, foi o programa utilizado para realizar a aquisição e análise dos dados da experiência. A frequência de aquisição de dados escolhida para o ensaio em questão foi de 5 Hz. Após a rotura da viga, é necessário elaborar o processamento dos dados obtidos, tendo em conta que a análise e obtenção de dados continua para além da rotura. A partir da carga última foi calculado o valor do momento flector último correspondente.

O segundo ensaio destrutivo realizado foi o ensaio de tracção nos fios de aço e para a realização deste ensaio, os fios foram cortados de acordo com os requisitos normativos em vigor da norma europeia em vigor, EN ISO 10002-1, *Metallic materials - Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature* [56]. Em termos geométricos, os provetes foram cortados com comprimentos de 32 cm, de maneira a que tivessem uma altura útil de teste de 20 cm. Devido a este factor, os provetes "m", não puderam ser experimentados, pois os troços foram cortados a partir das extremidades do fio de aço por se ter admitido que este sofreu deformações plásticas a meio vão, durante o ensaio de carga.

A máquina utilizada para a realização deste ensaio é da marca *Instron*, modelo 1343 e encontra-se ilustrada na Figura 3.15(a). Nesta máquina a amarração

dos provetes é feita através de pinças hidráulicas, com uma pressão de 15 bar e o controlo do ensaio fez-se através do comprimento de deformação, sendo a velocidade aplicada de 0,01 mm/s. Apenas quando o provete atinge a rotura, o ensaio é finalizado. As Figuras 3.15(b) e (c) demonstram em pormenor um provete pronto a ensaiar e um modo de rotura ocorrido, respectivamente.

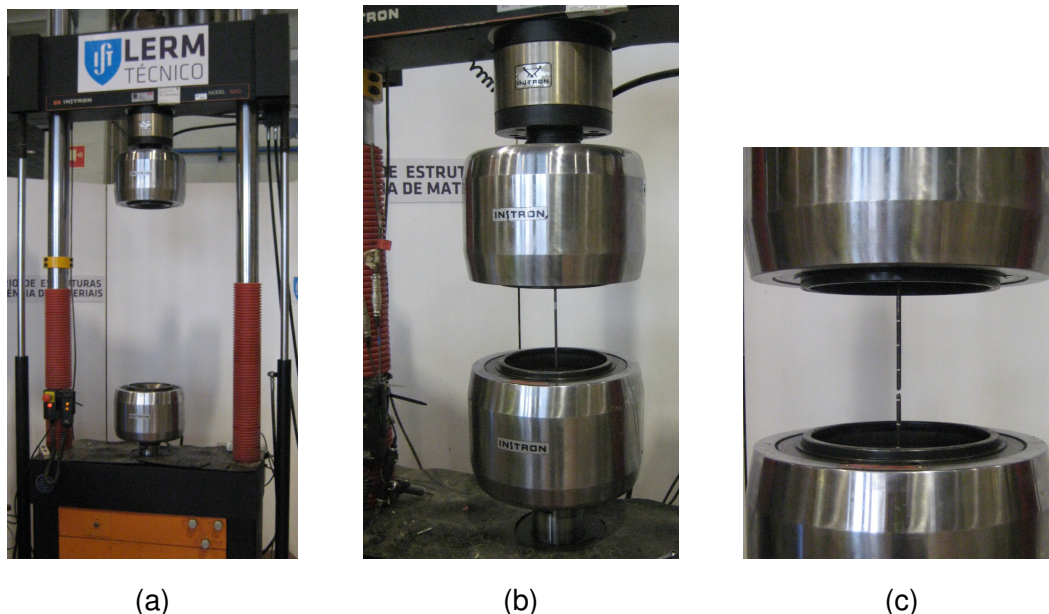


Figura 3.15: Fotografias retiradas aquando do ensaio de tracção. (a): máquina utilizada para a realização do ensaio; (b): provete preparado para ser ensaiado; (c): provete após rotura.

O sistema de aquisição de dados foi idêntico ao utilizado no ensaio da carga última, assim como o programa e o dispositivo de aquisição de dados foram idênticos aos utilizados no ensaio da carga última, sendo a frequência de aquisição de dados para este ensaio de 10 Hz.

Tendo em conta as normas europeias, torna-se relevante saber quais são os valores da extensão e da tensão nos provetes, até estes atingirem o colapso. Para tal foi necessário calcular a área média das secções dos provetes.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas diversas experiências realizadas. Na primeira secção serão abordados os resultados provenientes dos ensaios de corrosão e a segunda secção encontra-se dividida em cinco sub-secções, sendo que as quatro primeiras são relacionadas com os ensaios não destrutivos e os métodos de avaliação de dano, ou seja: frequências próprias, modos de vibração, método das curvaturas e a deformada. Por fim, a última secção do presente capítulo aborda os resultados dos ensaios destrutivos.

Considerando o objectivo deste trabalho, estabeleceu-se que seriam ensaiados vários modelos com diferentes percentagens de corrosão, de modo a ter-se uma maior noção dos efeitos do dano num elemento estrutural. As percentagens de dano pretendidas para cada modelo encontram-se representadas na Tabela 3.2.

Dos ensaios realizados denota-se que o modelo V2 e o modelo V9.1 tiveram alterações bruscas da intensidade de corrente aplicadas. No caso do modelo V2, esta alteração foi de curta duração e numa altura da imposição de dano em que não provocou estragos de maior no modelo, no entanto, no caso do modelo V9.1 a intensidade e a duração da alteração foram maiores, acrescido o facto de que ocorreu numa situação em que a viga já se encontrava prestes a atingir o dano pretendido, o que levou ao colapso do modelo durante a imposição de dano. Desta maneira, os modelos V2 e V9.1 apenas serão representados quando os resultados retirados destes modelos não forem afectados pela evolução da imposição de dano.

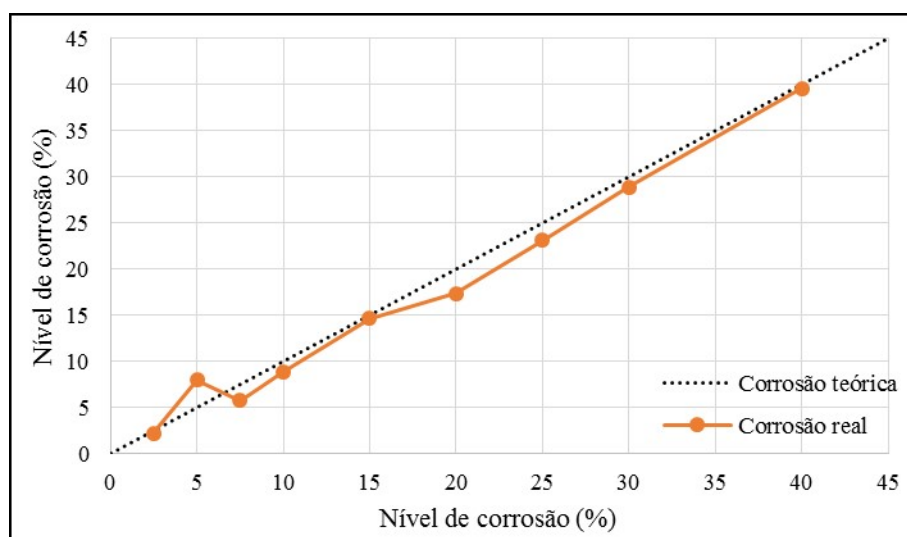
4.1 Corrosão Acelerada

A Tabela 4.1 apresenta o valor das corrosões reais obtidas nos fios de aço para cada modelo, designado por X_p . Nesta tabela é apresentada a nova designação de cada modelo, com base na percentagem de dano obtido. A título de exemplo, o modelo V1, obteve um dano de 2,2 % passando por isso a ser designado de modelo V1_2.

Tabela 4.1: Corrosão real obtida por modelo

Modelo	X_p (%)	Designação
V1	2,2 %	V1_2
V2	8,0 %	V2_8
V3	5,7 %	V3_6
V4	8,9 %	V4_9
V5	14,6 %	V5_15
V6	17,3 %	V6_17
V7	23,1 %	V7_23
V8	28,9 %	V8_29
V9.1	23,1 %	V9.1_23
V9.2	39,5 %	V9.2_40

Na Figura 4.1 é representado um gráfico comparativo entre os valores da corrosão real e os teóricos estimados com base na equação 2.3. É de salientar que a corrosão real medida ficou em geral sempre aquém dos valores teóricos pretendidos, apesar de se aproximar com erros muito diminutos.

Figura 4.1: Valores de X_p .

Por intermédio da Figura 4.1 e das Tabelas 4.1 e 4.2 denota-se que a percentagem de erro diminui à medida que a percentagem de dano introduzido vai aumentando. Os valores dos erros dos modelos iniciais podem ser relacionados com as velocidades de corrosão impostas, tendo sido necessário um tempo para destruir a membrana passivante, conforme demonstrado na Figura 2.3. Contudo, nos modelos que apresentam erros menores, a velocidade de corrosão apesar de se encontrar dependente do ataque à membrana, deve ser representada pela curva de velocidade D da Figura 2.3

Tabela 4.2: Percentagem do erro entre a corrosão pretendida e a obtida

Modelo	Erro (%)
V1_2	12,5 %
V3_6	23,4 %
V4_9	11,4 %
V5_15	2,4 %
V6_17	13,5 %
V7_23	7,7 %
V8_29	3,8 %
V9.2_40	1,2 %

Como foi descrito no capítulo 3, as tentativas de danos impostas passavam por aplicar uma corrosão homogénea em todo o fio de aço. Ao fazer a introdução de dano a um elemento com recobrimento de betão através do método de uma pilha eletroquímica, o dano causado fica dependente das propriedades e homogeneidade do betão envolvente. Sendo este material pouco homogéneo. Seria expectável que o dano causado não fosse totalmente homogéneo, tal como, de facto, veio a acontecer.

A Tabela 4.3 apresenta todos os valores obtidos da perda de massa para cada troço de cada modelo ensaiado. A corrosão média por modelo foi calculada tendo em conta o comprimento de cada troço. Na tabela encontram-se também os valores das áreas finais médias de cada troço. Estas áreas foram calculadas através de uma proporcionalidade directa, tendo em conta as suas massas e a massa de um troço sem dano, no qual é conhecido o valor da área.

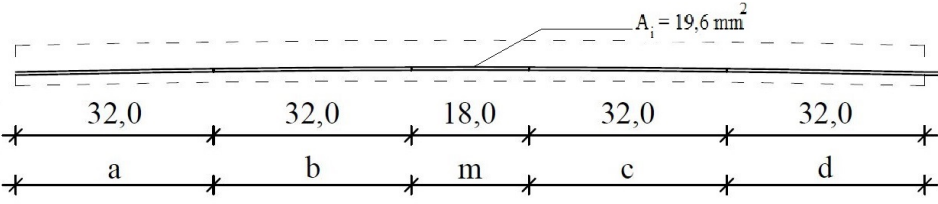
É de salientar que apesar do fio de aço inicial ser redondo e da metodologia utilizada pretender que a corrosão fosse homogénea, não surtiu esse efeito, como é visível, não só pelas diferenças dos valores da corrosão para o mesmo modelo, como pela Figura 4.2 que demonstra o efeito da corrosão num fio de aço, sendo o ataque corrosivo directo ao centro da secção, ao invés de corroer o exterior. Este pormenor corrosivo é demonstrativo do efeito da corrosão por *pite*, conforme foi visto na Figura 2.6.



Figura 4.2: Pormenor do ataque corrosivo no fio de aço.

Na Figura 4.3 encontram-se representadas as percentagens de corrosão de todos

Tabela 4.3: Percentagem de corrosão e secção transversal de cada troço



Modelo	Troço	X_p (%)	A_f (mm ²)	Modelo	Troço	X_p (%)	A_f (mm ²)
V1_2	a	1,7	19,3	V6_17	a	16,8	16,3
	b	1,2	19,4		b	16,8	16,3
	m	2,1	19,3		m	17,1	16,3
	c	2,6	19,1		c	18,4	16,0
	d	2,6	19,1		d	15,8	16,5
V2_8	a	2,3	19,2	V7_23	a	20,7	15,6
	b	6,4	18,4		b	26,6	14,4
	m	10,5	17,6		m	26,2	14,5
	c	9,8	17,7		c	24,5	14,8
	d	9,6	17,7		d	17,4	16,2
V3_6	a	3,5	18,9	V8_29	a	13,3	17,0
	b	3,5	18,9		b	26,3	14,5
	m	4,5	18,7		m	32,2	13,3
	c	7,6	18,2		c	40,3	11,7
	d	6,7	18,3		d	34,5	12,9
V4_9	a	8,7	17,9	V9.1_23	a	23,2	15,1
	b	7,6	18,2		b	32,9	13,2
	m	10,6	17,6		m	24,7	14,8
	c	10,2	17,6		c	18,4	16,0
	d	4,4	18,8		d	16,0	16,5
V5_15	a	14,8	16,7	V9.2_40	a	47,3	10,4
	b	14,8	16,7		b	25,4	14,6
	m	15,2	16,7		m	46,2	10,6
	c	14,3	16,8		c	43,2	11,2
	d	13,3	17,0		d	38,8	12,0

os troços, que foram apresentadas na Tabela 4.3, assim como a percentagem de corrosão média imposta no respectivo fio. Nas ordenadas do gráfico encontra-se a percentagem de corrosão imposta e nas abcissas reproduz-se a evolução do comprimento do modelo, sendo 0 mm a extremidade mais afastada da ligação à fonte de alimentação. A traço cheio é demonstrada a percentagem de corrosão que o modelo sofreu. É visível que o modelo se encontra representado por patamares, sendo que cada um destes patamares representa um dos troços que foi cortado do fio de aço. Sendo assim explícito que em cada modelo o dano sofrido não foi homogéneo em todo o fio. A recta a traço interrompido representa o valor médio de corrosão medida.

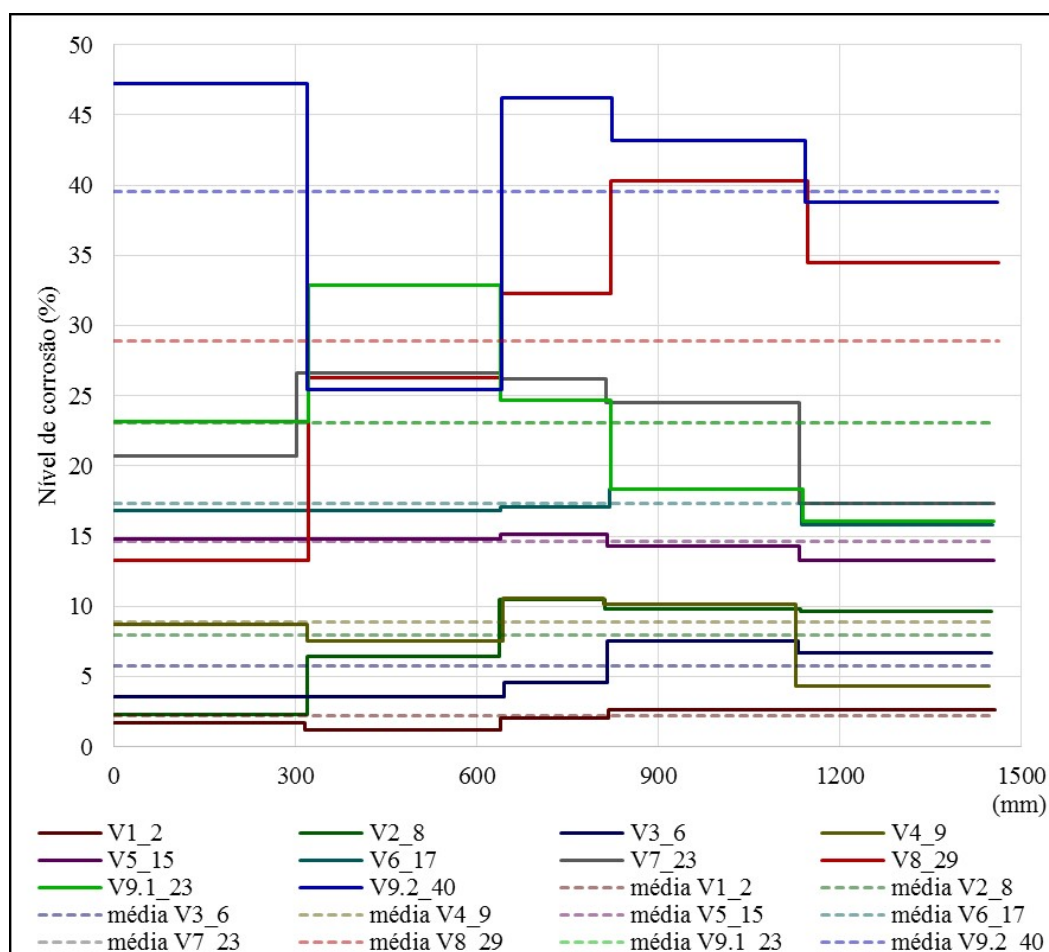


Figura 4.3: Percentagem de dano por troço ao longo de cada modelo.

Em todos os modelos excepto no V9.2_40, um dos três troços do meio é o que apresenta maior valor de corrosão. Este fenómeno pode ser explicado, pelo facto destes troços se encontrarem mais perto do local onde é realizada a ligação entre o cátodo e a fonte de alimentação, conforme demonstrado nas Figuras 3.4 e 3.5 [8].

O maior valor de desvio padrão que se verificou nos dez modelos foi de aproximadamente 10,3 % e ocorreu no modelo V8_29. Este valor de desvio padrão está de acordo com o que é possível visualizar na Figura 4.3, em que o modelo com maior desnível de percentagem de corrosão, entre os troços, é o modelo V8_29. No entanto, o desnível mais simples de identificar é o desnível existente no modelo V9.2_40, entre o primeiro e o segundo troço, contudo, devido ao facto dos outros desníveis existentes ao longo deste modelo serem pequenos e relativamente aproximados do valor médio, amortizam o valor do desvio padrão desse modelo, tendo assim o segundo maior valor de desvio padrão, com aproximadamente 8,9 %.

Tabela 4.4: Desvio padrão dos troços dos modelos

Modelo	X_p (%)	σ (%)	$\sigma_{relativo}$
V1_2	2,2	0,61	0,28
V2_8	8,0	3,401	0,43
V3_6	5,7	1,86	0,32
V4_9	8,9	2,50	0,28
V5_15	14,6	0,72	0,05
V6_17	17,3	0,92	0,05
V7_23	23,1	3,96	0,17
V8_29	28,9	10,25	0,36
V9.1_23	23,1	6,52	0,28
V9.2_40	39,5	8,88	0,23

Uma vez que o valor do desvio padrão, de um modelo, é calculado a partir do valor da média, de cada modelo, isto por si só, não representa devidamente as diferenças existentes, considerando que a média varia de modelo para modelo. Para tal, ao fazer-se o quociente do desvio padrão pela média de dano existente em cada modelo, torna-se possível uniformizar e comparar a qualidade dos resultados, surgindo assim o $\sigma_{relativo}$. Isto é, se a média for considerada 1, o desvio padrão relativo representa o valor do desvio padrão.

Como é possível verificar na Tabela 4.4, na coluna do desvio padrão relativo, denota-se que o modelo V2_8 é o que possui o desvio padrão maior, tendo em conta a sua média, com um valor de $\sigma_{relativo}$ de 0,43. Contudo, o modelo V8_29 continua a apresentar um valor de desvio padrão relativo bastante elevado de aproximadamente 0,36. Contrariamente, o modelo V9.2_40 que no desvio padrão apresentava o segundo maior valor, denotou ter um $\sigma_{relativo}$ mediano.

Avaliando a homogeneidade da corrosão estabelecida, chega-se à conclusão que a média do desvio padrão dos troços dos modelos, é de aproximadamente 25 % tendo em conta o valor de dano implementado.

4.2 Ensaios Experimentais

Na presente secção serão vistos e analisados os resultados obtidos, provenientes dos ensaios realizados para averiguar a qualidade das metodologias de análise de dano e os valores dos ensaios destrutivos e não destrutivos, tendo em conta os danos implementados nos diversos modelos.

4.2.1 Frequências Próprias de Vibração

De forma a realizar-se uma adequada análise das frequências próprias dos modelos, foi realizado à priori o cálculo do valor da frequência natural teórica. A equação utilizada para estes cálculos encontra-se no anexo A, na equação A.1.

Sendo, o valor da frequência natural dos modelos simplesmente apoiados de, aproximadamente, 51 Hz.

O método de análise experimental de frequências utilizado realizou-se com o suporte do *software Artemis*, fundamentado num algoritmo com base nas transformadas de Fourier. A Figura 4.4 demonstra o resultado das análises elaboradas para cada modelo. A traço cheio é representada a evolução da frequência ao longo da introdução de dano e a traço interrompido é representada a ligação das duas leituras realizadas antes e após a colocação de corrosão.

Os resultados das frequências próprias providenciado pelo programa *Artemis*, são, em regra, bastante assertivos, tendo em consideração os valores da frequência própria teórica calculada, que seria de, aproximadamente, 51 Hz. Analisando a Figura 4.4, é visível que o valor das frequências não sofre nenhuma alteração significativa durante o processo de introdução de dano, em regra e, salvo raras exceções não contínuas, a frequência varia entre o valor da primeira medição dentro da solução líquida e $\pm 1,5$ Hz. Logo a metodologia para a avaliação de dano, estando o modelo imerso na solução líquida torna-se ineficaz, isto é sublinhado através do modelo V9.1_23, que colapsou durante a introdução de dano, sendo que não foi possível registar diferença alguma visível através dos resultados obtidos pelo *Artemis*.

Contudo, avaliando os resultados alcançados no início e no final do processo de dano, denota-se que o declive da recta a tracejado é quase sempre negativo. Tendo este facto em consideração, foi realizada uma análise mais aprofundada das medições registadas no exterior do reservatório de água. A Figura 4.5 sintetiza esta análise, sendo que cada ponto representa em percentagem o valor da frequência final, tendo em conta a frequência inicial de cada modelo. Realizando uma regressão linear a estes pontos torna-se possível constatar a existência de uma tendência para uma diminuição gradual na frequência final, que atinge os 8,7% com 40% de corrosão.

Desta maneira, a variação de frequência final, tendo em conta a inicial, pode ser um apontador para a possibilidade de existência de dano no modelo, sendo no entanto infrutífera em relação à localização do dano no modelo.

4.2.2 Método da Variação dos Modos de Vibração

As estimativas de frequências próprias através do programa *Artemis* estão associadas a um modo de vibração. Os gráficos contidos da Figura 4.6 à 4.15 representam o primeiro modo de vibração associado às frequências próprias de cada modelo. As respectivas funções de forma representadas encontram-se normalizadas, de maneira a conseguir compará-las. Nas abcissas, é representado o comprimento da viga, através dos nós equidistantes, que são compostos pelas extremidades e os locais onde se encontravam os acelerómetros, sendo o nó 10, a extremidade da ligação à fonte de alimentação. No eixo das ordenadas é

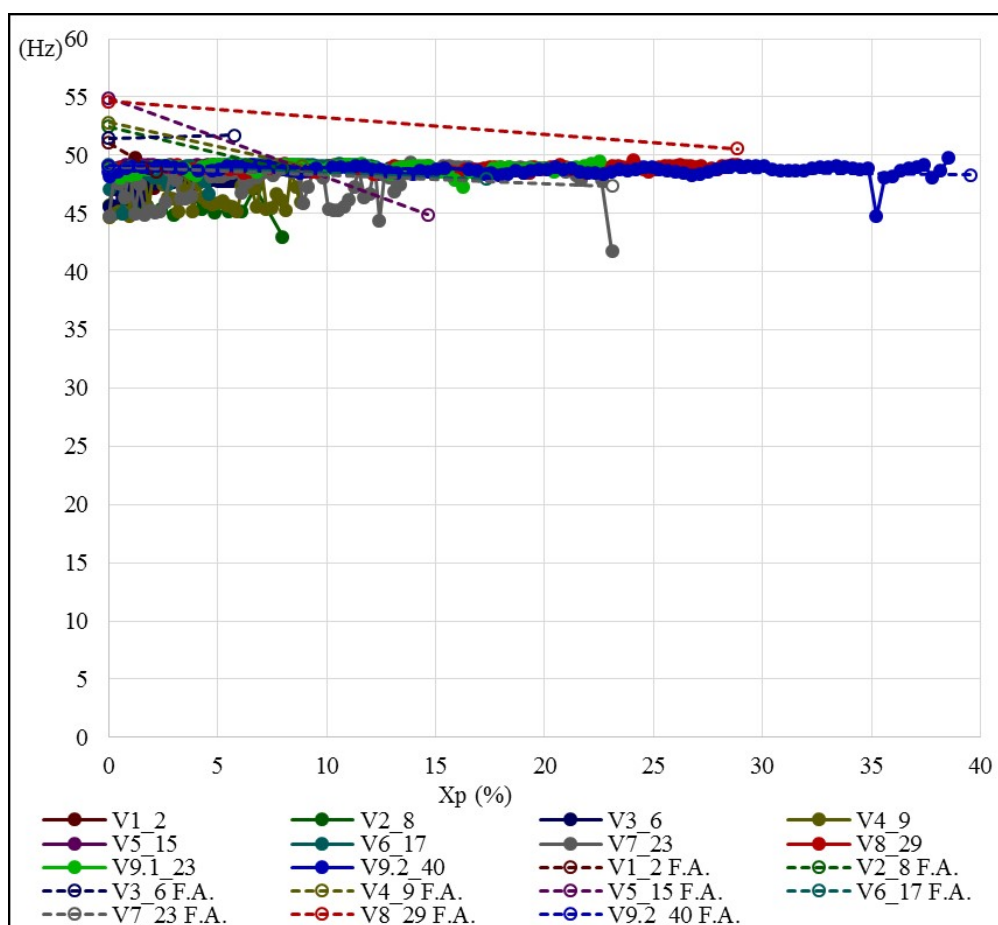


Figura 4.4: Gráfico do desenvolvimento das frequências ao longo da introdução de dano através do programa Artemis.

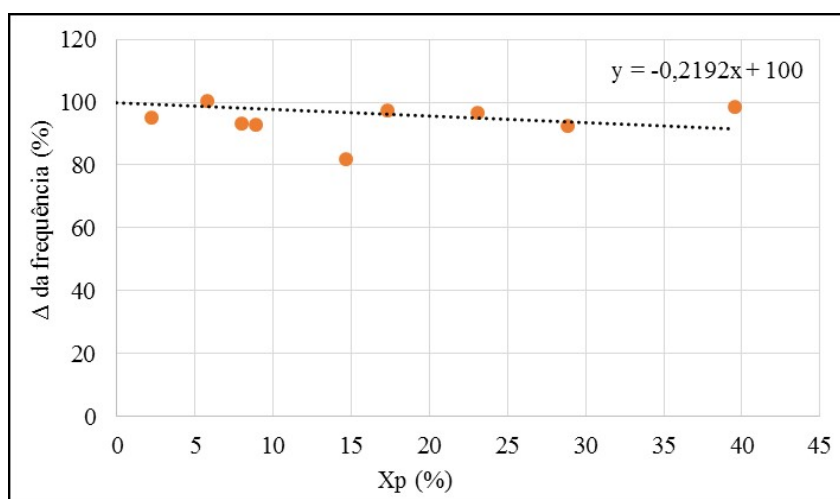


Figura 4.5: Gráfico da porcentagem da frequência própria final tendo em conta a inicial.

apresentado o valor que a função forma obteve para o respectivo nó.

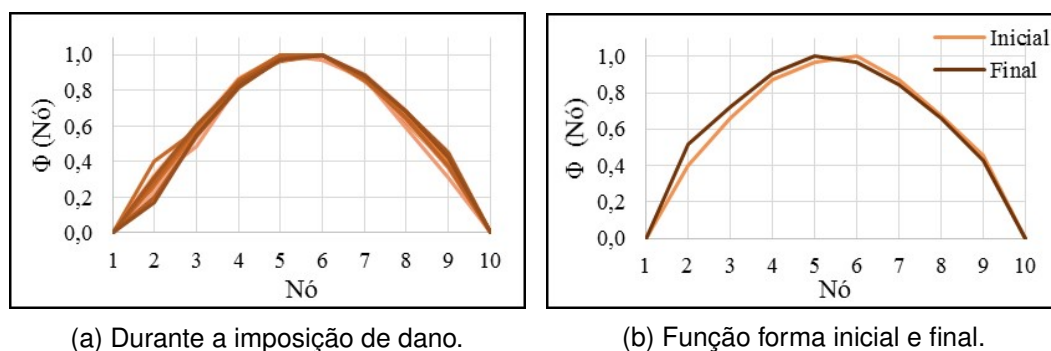


Figura 4.6: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V1_2.

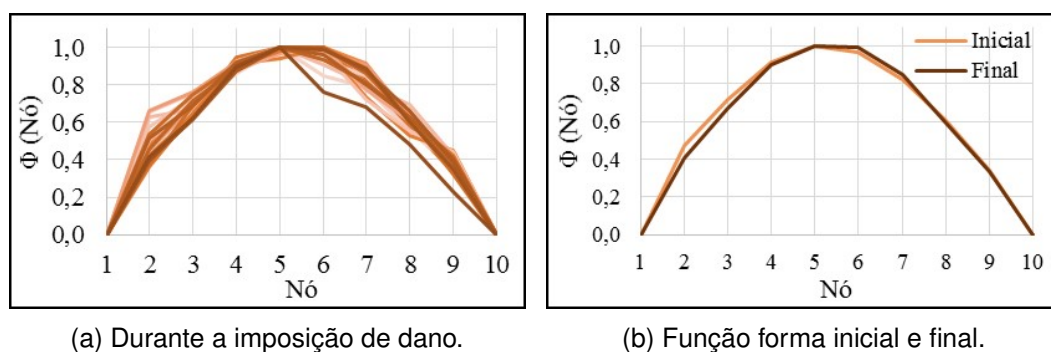


Figura 4.7: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V2_8.

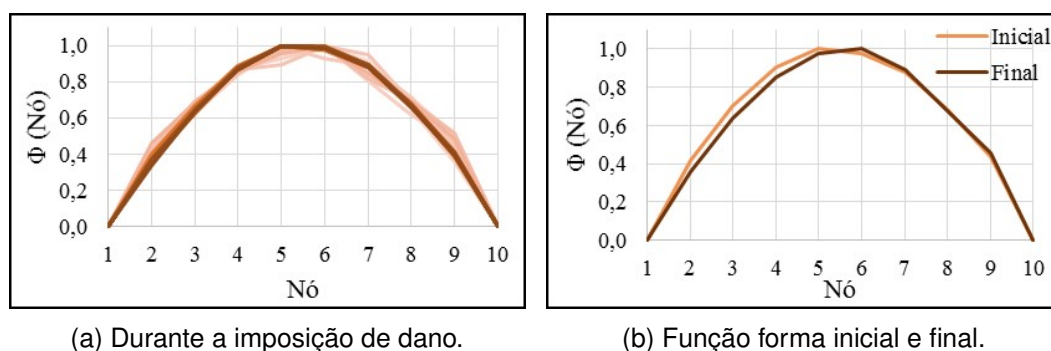
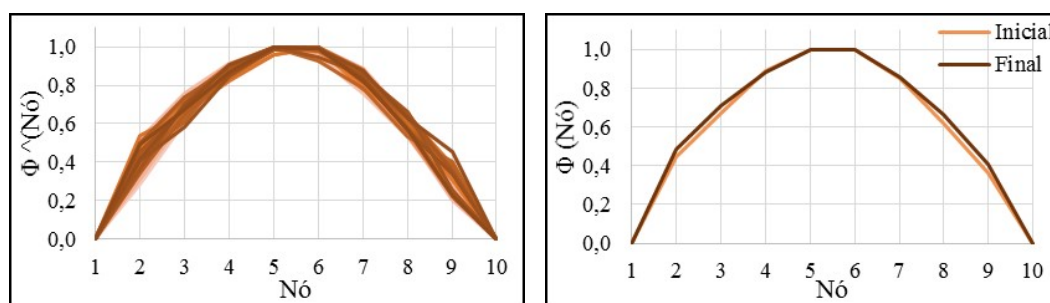


Figura 4.8: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V3_6.

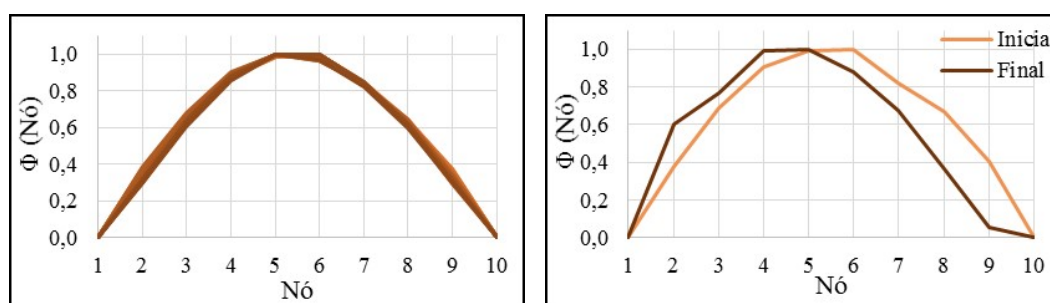
No gráfico (a) de cada uma destas figuras são representadas todas as funções forma das análises realizadas no respectivo modelo ao longo da introdução do dano. Assim sendo, a função forma, $\phi(NÓ)$ escurece à medida que o dano vai aumentando. No gráfico (b) das mesmas figuras, encontram-se representadas as funções forma das análises iniciais e finais de cada modelo. A Figura 4.14 representa as funções forma do modelo V9.1_23 ao longo da introdução da



(a) Durante a imposição de dano.

(b) Função forma inicial e final.

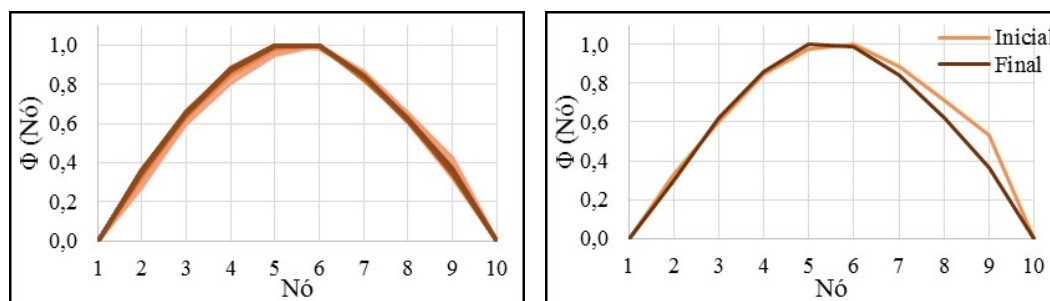
Figura 4.9: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V4_9.



(a) Durante a imposição de dano.

(b) Função forma inicial e final.

Figura 4.10: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V5_15.



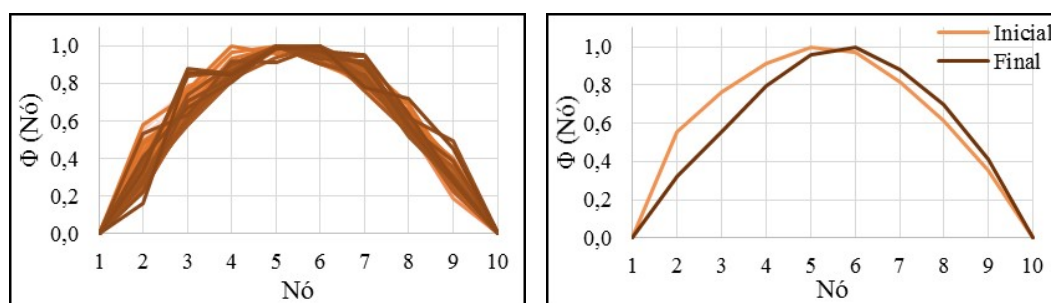
(a) Durante a imposição de dano.

(b) Função forma inicial e final.

Figura 4.11: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V6_17.

degradação, neste modelo não se realizou a análise final devido ao colapso.

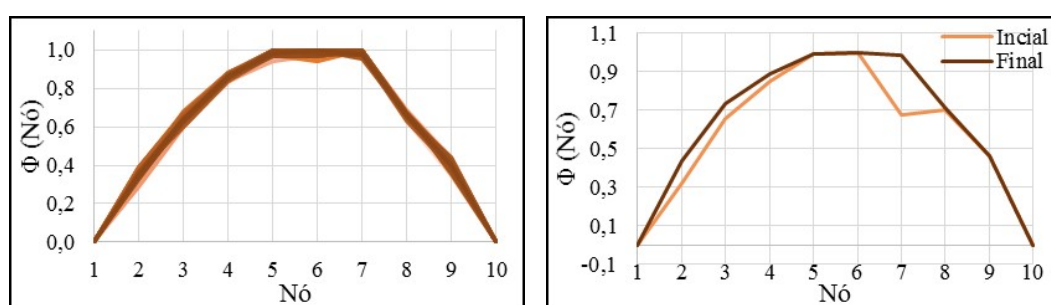
Devido à introdução de dano através de corrosão, apareceram outros efeitos de dano na viga, para além da perda de massa do fio de aço. Estes efeitos acontecem devido à pressão interna no betão de recobrimento causada pela massa libertada do fio de aço, conforme já foi referido na secção 2.1. Os efeitos desta pressão interna nos modelos realizados são em regra duas fendas longitudinais mais significativas. A primeira aparece na face inferior da viga e a segunda destaca-se numa ou em ambas as faces laterais. Na Figura 4.16 é possível ver exemplificado o aspecto das fendas longitudinais que surgiram nas faces inferiores e laterais



(a) Durante a imposição de dano.

(b) Função forma inicial e final.

Figura 4.12: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V7_23.



(a) Durante a imposição de dano.

(b) Função forma inicial e final.

Figura 4.13: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V8_29.

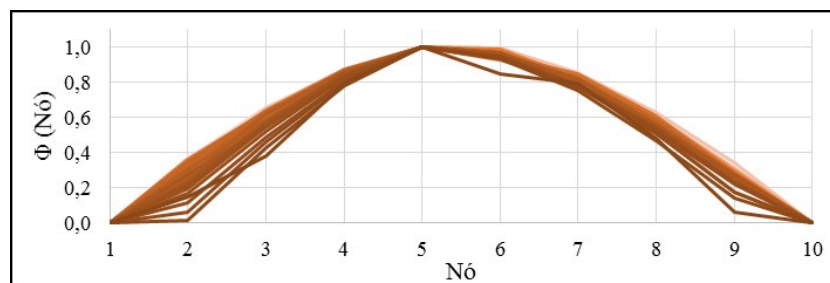
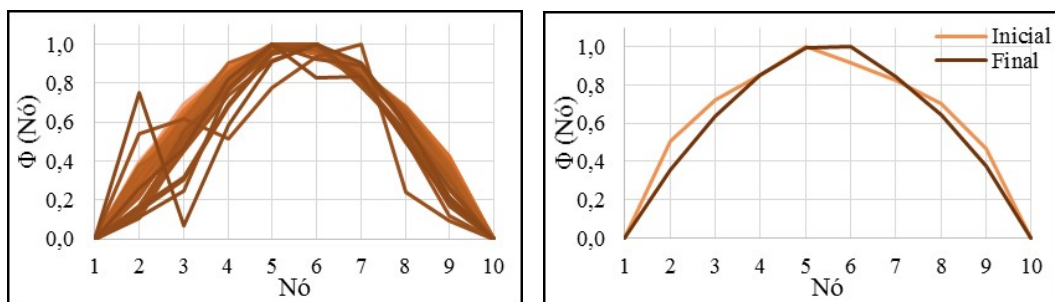


Figura 4.14: Função forma do modelo V9.1_23 durante a imposição de dano.

dos modelos.

A primeira fenda, a fenda na face inferior, surgiu em todos os modelos, com diferentes comprimentos e aberturas de fenda, conforme é visível na Figura 4.17. Nesta figura é visível a evolução da fenda inferior ao longo dos diferentes modelos, sendo perceptível o aumento da largura da fenda com o aumento da percentagem de corrosão. A segunda fenda não ocorre nos modelos com níveis de dano mais baixos, só começando a surgir partir do modelo V5_15, com exceção ao modelo V2_8, devido aos motivos já referidos.

No geral, atendendo às imagens (a) das Figuras 4.6 à 4.15 são visíveis pequena



(a) Durante a imposição de dano.

(b) Função forma inicial e final.

Figura 4.15: Funções forma do modo 1 ao longo do modelo V9.2_40.



(a) Face inferior.



(b) Face lateral.

Figura 4.16: Fendas longitudinais recorrentes nos modelos.

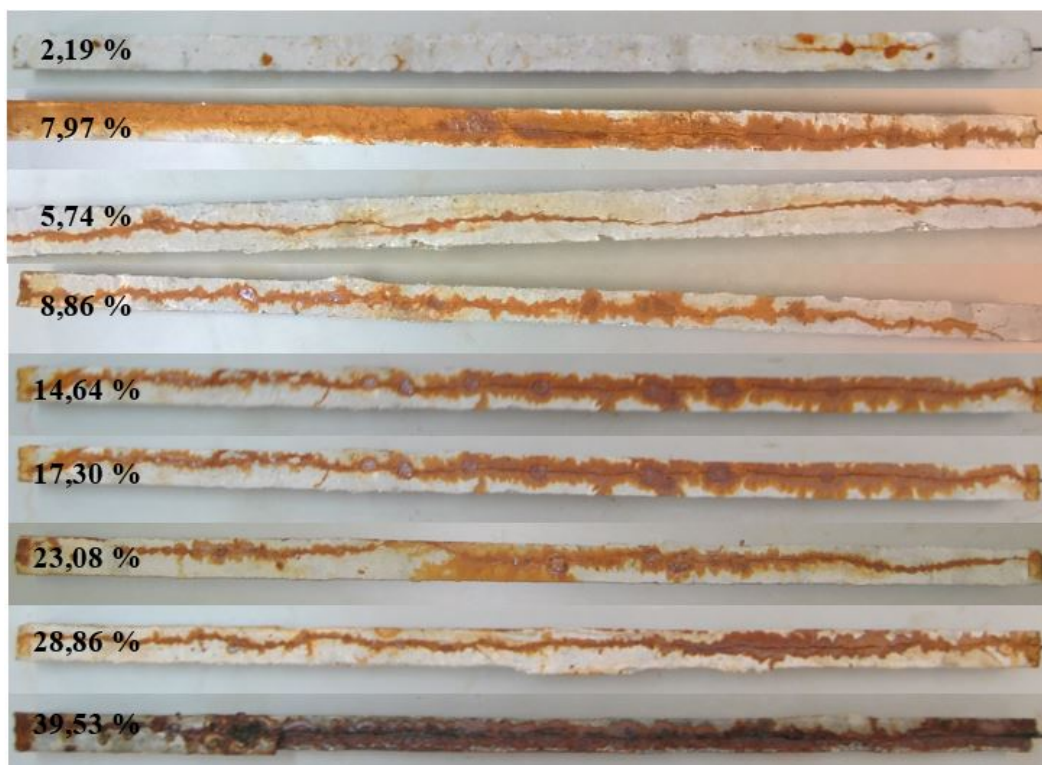


Figura 4.17: Fenda na face inferior dos modelos.

alterações nas funções forma, dos vários modelos, ao longo da introdução de dano, existindo, no entanto, alguns casos a salientar, devido às alterações existentes nas diferentes funções forma para o mesmo modelo.

A Figura 4.7(a) corresponde à evolução da função de forma do modelo V2_8. Na última função forma estimada durante a introdução de dano, identificada através da cor castanho escuro, denota-se algumas diferenças em relação às restantes. Estas diferenças podem ter surgido devido ao aumento repentino da intensidade de corrente que ocorreu e à respectiva fenda daí proveniente, devido ao aumento súbito da pressão interna. A Figura 4.18 demonstra que a fenda surge nos nós onde a função forma tem uma alteração maior.



Figura 4.18: Face lateral do modelo V2_8 após a introdução de dano.

Nas Figuras 4.12(a) e 4.15(a) verificam-se diversas alterações significativas nas últimas estimativas das funções forma dos modelos V7_23 e V9.2_40 respectivamente. No modelo V9.2_40 o principal motivo para estas variações deve-se ao surgimento de uma fenda longitudinal, que levou ao destacamento quase integral da face inferior da viga, conforme é visível na Figura 4.19. Comparando esta figura com as funções forma estimadas para o respectivo modelo, é visível que, as alterações maiores nas funções forma se dão nas zonas onde a viga perdeu massa por destacamento do recobrimento de betão. No modelo V7_23, no entanto, o motivo para tal alteração não aparenta ser tão explícito, pois não foi encontrada nenhuma alteração ao nível das alterações registadas pelas funções forma finais. A Figura 4.20 apresenta a face lateral mais danificada do modelo V7_23.



Figura 4.19: Modelo V9.2_40 após a introdução de dano, sem contacto com a solução líquida.



Figura 4.20: Face lateral do modelo V7_23 após a introdução de dano.

É de salientar, que tanto no modelo V9.1_23, como no modelo V9.2_40, é visível nas Figuras 4.14 e 4.15(a) a variação das funções forma do início para o fim da introdução de dano e isto é perceptível através do escurecer das funções forma, sendo que, no caso do modelo V9.1_23 a última função forma estimada ocorre poucas horas antes do colapso da viga, através de um ataque pontual no fio de aço, conforme pode ser visto na Figura 4.21.



Figura 4.21: Pormenor do colapso ocorrido no modelo V9.1_23.

Em relação ao gráfico (b) da Figura 4.6 à 4.15 não existe uma regra de maneira a identificar dano nos diferentes modelos, isto pode ser causado pela uniformidade da degradação introduzida. Contudo a partir do modelo V5_15, começa a denotar-se, constantemente, uma diferença entre as funções forma inicial e final, o que pode indicar a presença de um local com uma degradação mais acentuada, em comparação com o restante modelo.

Em regra, o diagnóstico de dano através da metodologia baseada na variação das funções forma dos modelos foi capaz de analisar com mediana precisão a existência e a gravidade do dano existente. Sendo de salientar que com o aumentar da degradação estrutural, esta metodologia vai produzir resultados mais acertados. Outra conclusão deste diagnóstico é a alteração do diagnóstico de dano quando os modelos deixam de estar em contacto com a solução líquida. Havendo assim diferentes diagnósticos para o mesmo modelo.

4.2.3 Método da Variação da Curvatura

A última metodologia aplicada na averiguação da presença e localização de dano nos modelos, foi o Método da Variação da Curvatura.

As curvaturas dos dez modelos ensaiados encontram-se representadas desde a Figura 4.22 até à Figura 4.31. Exceptuando o modelo V9.1_23, que apresenta a evolução da curvatura durante a colocação de dano, todas as curvaturas dos restantes modelos são representadas em três imagens, cuja imagem (a) representa um gráfico com a evolução das curvaturas ao longo da imposição do dano. Para além deste gráfico, as figuras apresentam uma imagem (b) que retrata a curvatura inicial e final, calculadas a partir da estimativa das respectivas análises. A imagem (c) apresenta a diferença da curvatura entre o modo inicial e o final assim como um resumo da degradação existente no respectivo modelo,

através do nível de corrosão que cada troço obteve e da localização da fenda na face inferior. Tal como nos gráficos das funções forma, a evolução das curvaturas verifica-se através da cor mais escura, acompanhando o aumento de dano no modelo.

A avaliação da qualidade da metodologia, baseada na alteração das curvaturas, é realizada com o auxílio de alguns parâmetros: a localização de dano na estrutura, a localização de dano nos fios de aço e a localização de fendas nas vigas, através da observação durante e após o ensaio. As Figuras C.1 e C.2 demonstram as vistas laterais dos modelos após o dano e a figura (c) com o auxílio da Tabela 4.3 avalia a degradação existente no fio de aço.

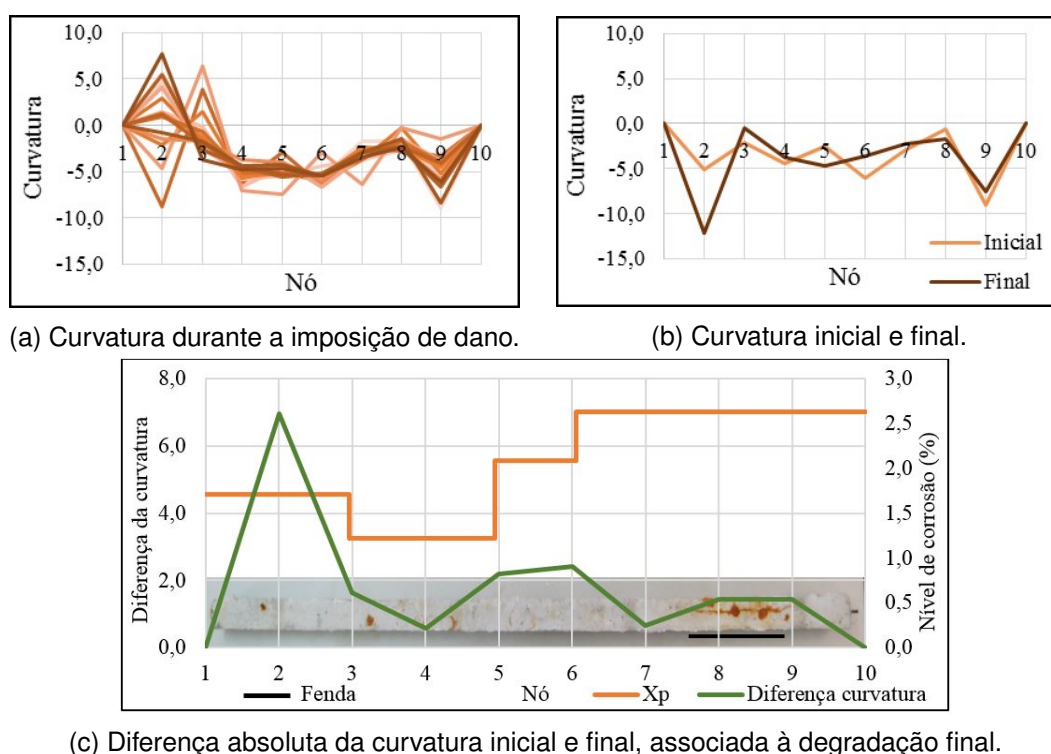


Figura 4.22: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V1_2.

No modelo V1_2, a principal diferença nas curvaturas ocorre no local do Nó 2, conforme é visível nos três gráficos da Figura 4.22. Na imagem (a), o local do Nó 2 apresenta uma gradual alteração da curvatura durante a imposição de dano e as imagens (b) e (c) sustentam esta informação ao apontarem o Nó 2 como o valor máximo da diferença, entre o modo inicial e o final. Contudo, através da figura 4.22(c), C.1 e C.2 é visível que a degradação existente neste modelo é, em regra, uniforme, contrariando assim a avaliação estimada, pois não existe motivo aparente para o máximo obtido. No entanto, o método das variações das curvaturas regista uma avaliação na qual todo o modelo aparentar ter dano, pois a diferença entre a curvatura inicial e final é superior a 1 em quase toda a viga.

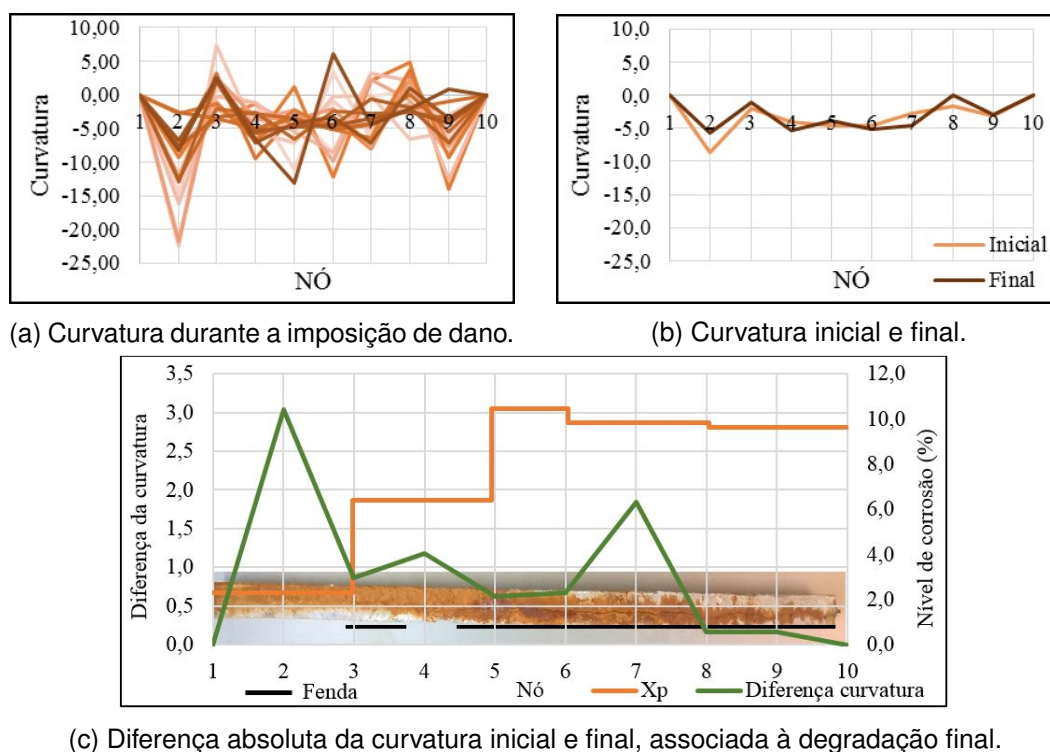
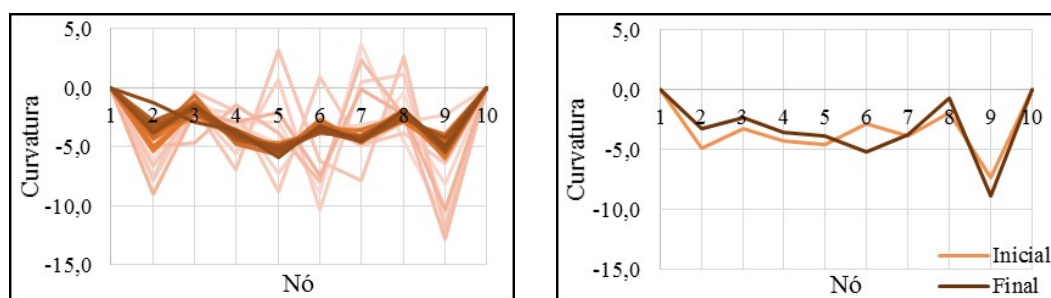


Figura 4.23: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V2_8.

No modelo V2_8, o maior dano foi encontrado nos Nós 2 e 7, apesar da ordem de grandeza da diferença não ser assinalável, quando comparando com outros modelos, conforme representado na Figura 4.23 onde ambos os Nós são identificados pelas diferenças existentes da curvatura durante a colocação de dano e pela diferença inicial e final. Denota-se através da Figura 4.23(c), que o Nó 7 encontra-se na região com maior nível de corrosão da viga, o que levou ao surgimento de fendas na face inferior e em ambas as faces laterais, de acordo com as Figuras C.1 e C.2. Contudo, no Nó 2 não foi encontrado nenhum tipo de degradação que levasse à distinção de máximo absoluto na função da diferença de curvatura.

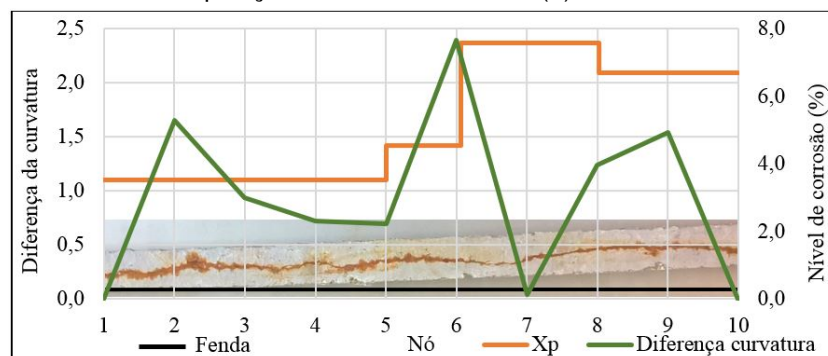
O diagnóstico realizado através do método das curvaturas do modelo V3_6, demonstrado nos gráficos da Figura 4.24, aponta os Nós 2, 6 e 9 como os locais de maior degradação, havendo, no entanto, uma degradação geral ao longo do modelo. Tendo em consideração as Figuras C.1 e C.2 é visível uma fenda, numa face lateral, desde o Nó 2 até ao Nó 9, podendo esta ser o motivo das diferenças da curvatura nestes Nós. Através da Figura 4.24(c) e da Tabela 4.3, é perceptível que os locais com maior corrosão são as regiões entre o Nó 6 e o Nó 10.

Analisando a Figura 4.25(c) torna-se claro que a diferença de curvaturas inicial e final estima uma degradação estrutural nas regiões entre os Nós 2 a 4 e entre os Nós 7 a 9. Esta avaliação pode ser considerada correcta, pois nestes locais houve o aparecimento de fendas na face inferior e na face lateral, como pode ser



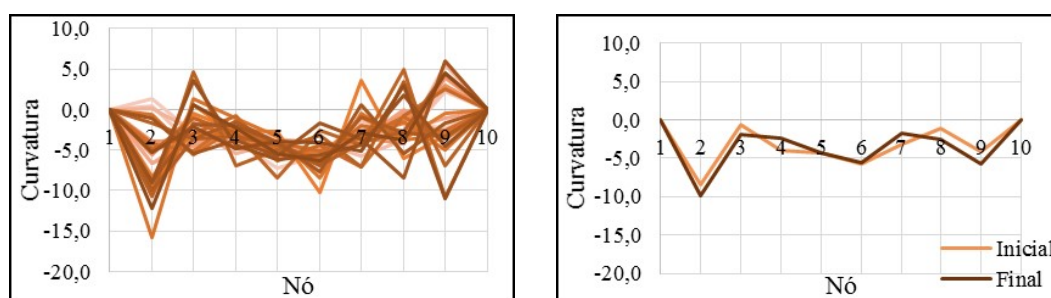
(a) Curvatura durante a imposição de dano.

(b) Curvatura inicial e final.



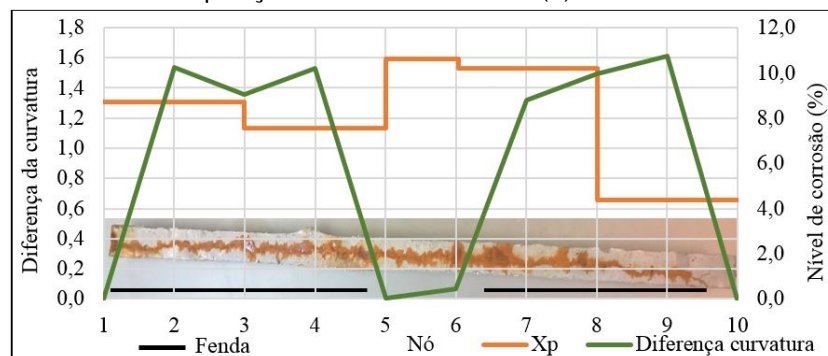
(c) Diferença absoluta da curvatura inicial e final, associada à degradação final.

Figura 4.24: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V3_6.



(a) Curvatura durante a imposição de dano.

(b) Curvatura inicial e final.



(c) Diferença absoluta da curvatura inicial e final, associada à degradação final.

Figura 4.25: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V4_9.

verificado nas Figuras 4.25(c), C.1 e C.2. Através da diferença das curvaturas, seria plausível admitir que as zonas em torno dos Nós 5 e 6 teriam uma degradação muito diminuta, contudo, foi nestas regiões que o fio de aço registou uma maior percentagem de corrosão, conforme é visível na Figura 4.25(c).

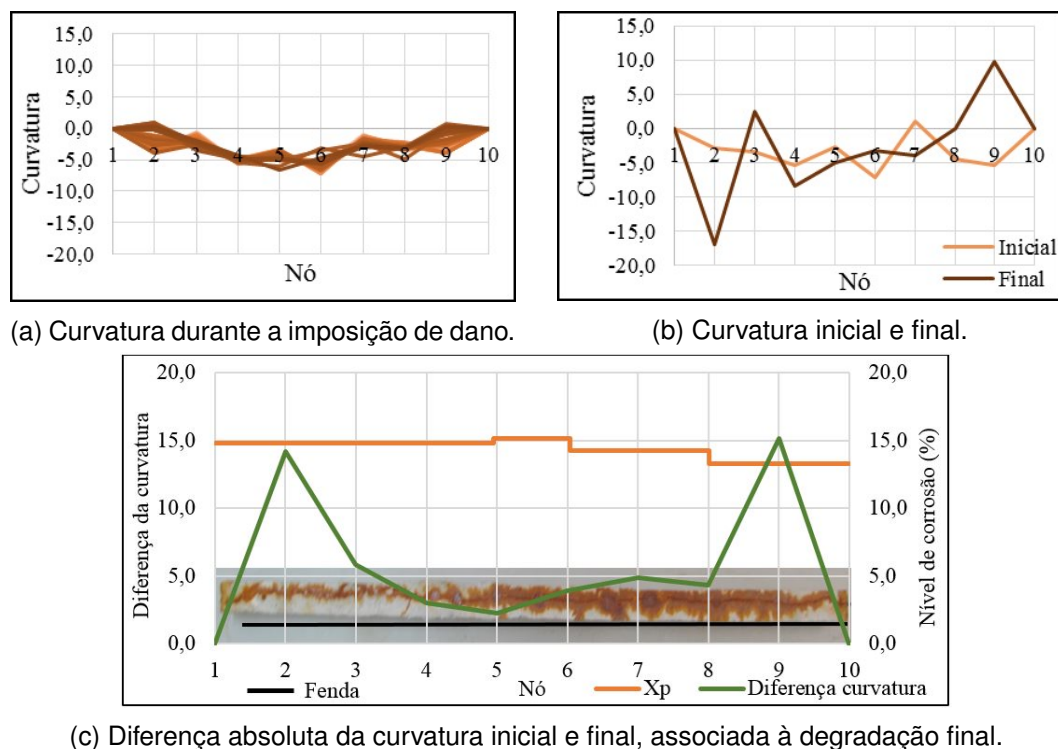


Figura 4.26: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V5_15.

Ao contrário do modelo anterior, no modelo V5_15 a evolução da curvatura ao longo da introdução do dano possui uma variação pouco considerável. Assim sendo, através dessa avaliação não é possível identificar com clareza a presença de dano, Figura 4.26(a). As diferenças das curvaturas presentes no gráfico (b) da Figura 4.26 demonstram uma diferença significativa, no Nó 2 e no Nó 9. Apesar dos valores da diferença serem mais pequenos do que nestes dois Nós, toda a viga aparenta estar danificada, o que está de acordo com a corrosão introduzida e demonstrada na Figura 4.26(c). Analisando os parâmetros definidos para caracterizar o dano, não existe motivo aparente para a existência do pico no Nó 9, contudo em relação ao máximo atingido no Nó 2, pode explicar-se pelas fendas presentes nestes locais na face lateral, conforme é visível nas Figuras C.1 e C.2.

O modelo V6_17 apresentou, através do método da curvatura, dois Nós de dano, os 2 e 9, Figura 4.27. Na Figura 4.27(a) é possível acompanhar com nitidez a evolução da curvatura com o aumentar do dano, sendo simples de identificar os dois picos existentes na Figura 4.27(c) e provenientes da diferença existente das curvaturas inicial e final. Neste modelo os parâmetros de degradação aparentam uma degradação uniforme, sendo a região ao redor do Nó 2 a única exceção,

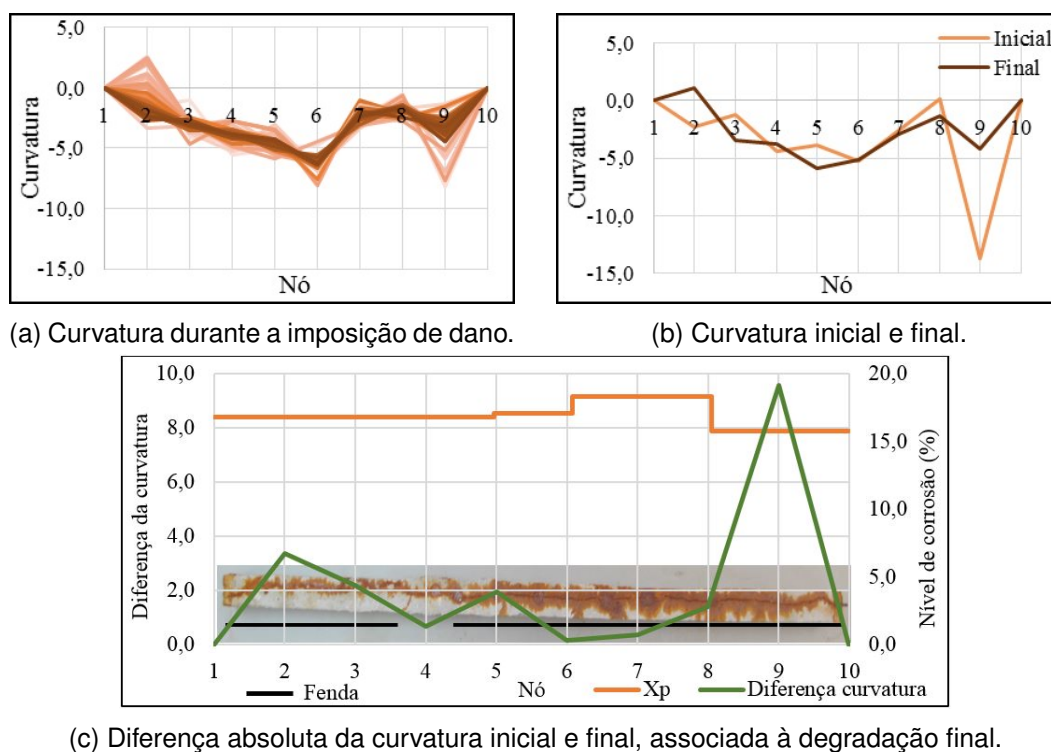
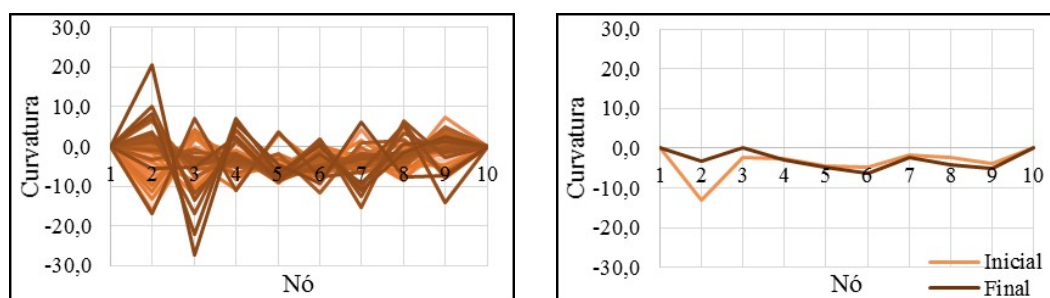


Figura 4.27: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V6_17.

tanto em termos de nível de corrosão, como de surgimento de fendas, conforme pode ser demonstrado nas Figuras 4.27(c), C.1, C.2, onde a única fenda existente está contida na face inferior.

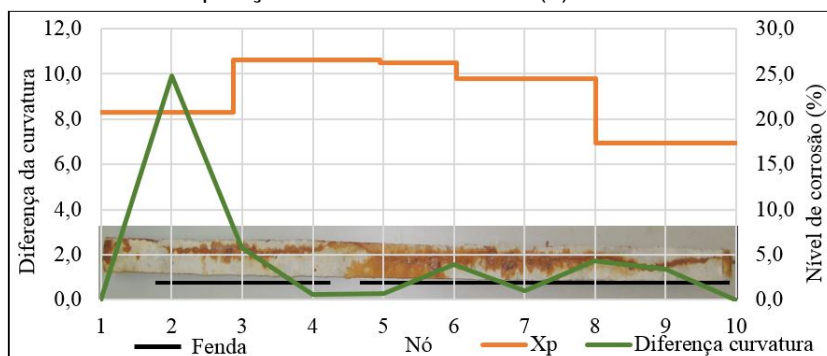
Através da Figura 4.28 tornou-se claro que o Nó 2 seria uma potencial localização de dano, não apenas verificada pela evolução das curvaturas, Figura 4.28(a), mas sobretudo devido à diferença entre a curvatura inicial e final, atingindo uma diferença substancial comparando com o restante modelo, o modelo V7_23, no entanto, os parâmetros de degradação não corroboram com este diagnóstico de dano. Tendo em conta que o método das curvaturas é feito através da diferença entre duas curvaturas, pode dizer-se que os Nós 6, 8 e 9 também são possíveis locais de presença de degradação. Através da Figura 4.28(c), é possível verificar que a zona do troço "m" foi onde ocorreu maior corrosão, sendo que, nos limites deste troço encontravam-se os Nós 5 e 6. O parâmetro da fendilhação, neste modelo, demonstra a existência de fendas longitudinais nas três faces relevantes, sendo a sua abertura maior na zona do Nó 8, como é visível nas Figuras 4.17, C.1 e C.2.

No modelo V8_29, o método da variação das curvaturas, estima a existência de degradação nas zonas dos Nós 2, 6, 7 e 8, tal como é visível na Figura 4.29(c). Segundo o mesmo método, a região em torno do Nó 9 pode igualmente ser uma região com dano, conforme é demonstrado na Figura 4.29(a). Através da Figura 4.29(c) é visível que a zona de maior corrosão do fio de aço é coincidente



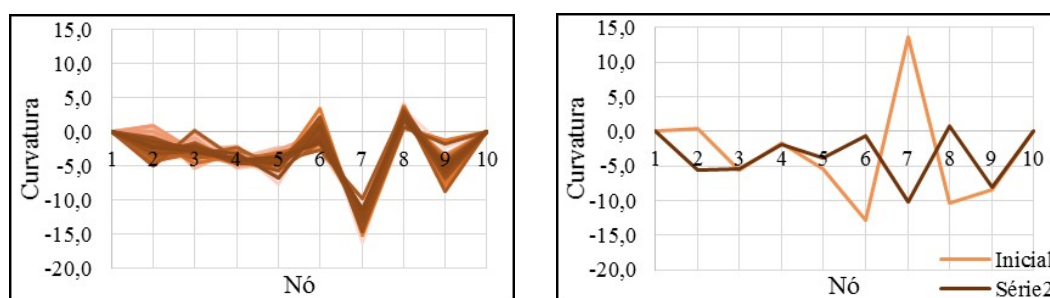
(a) Curvatura durante a imposição de dano.

(b) Curvatura inicial e final.



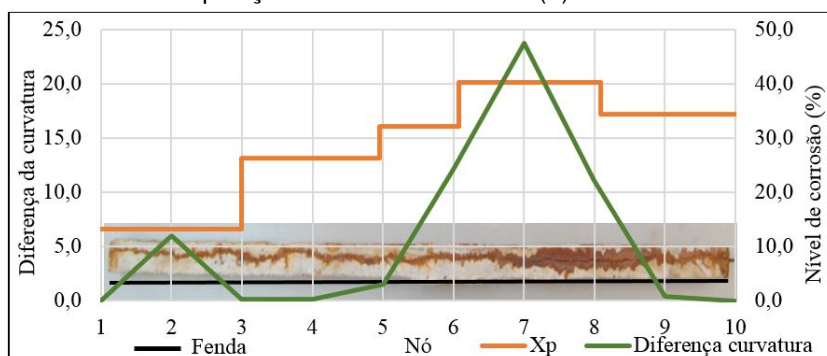
(c) Diferença absoluta da curvatura inicial e final, associada à degradação final.

Figura 4.28: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V7_23.



(a) Curvatura durante a imposição de dano.

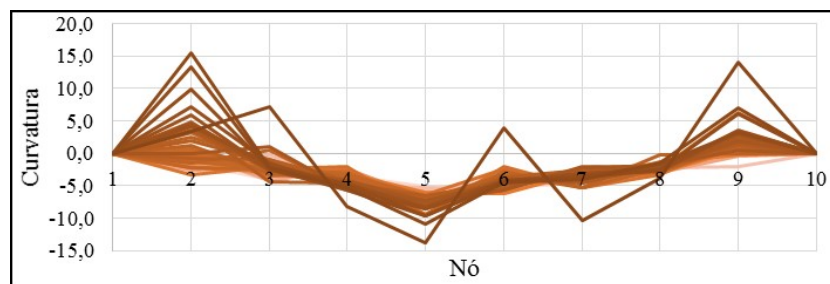
(b) Curvatura inicial e final.



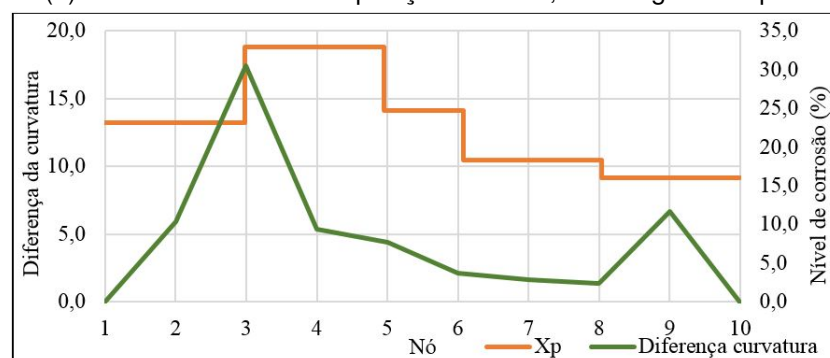
(c) Diferença absoluta da curvatura inicial e final, associada à degradação final.

Figura 4.29: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V8_29.

com o máximo obtido na diferença da curvatura, o Nó 7. Devido à introdução de dano neste modelo ocorreram duas fendas, uma na face inferior e outra na face lateral, sendo que a abertura das fendas aumentou na zona entre o Nó 6 e o Nó 8, segundo as Figuras 4.17, C.1 e C.2, de acordo com a estimativa de degradação realizada.



(a) Curvatura durante a imposição de dano, até atingir o colapso.



(b) Diferença absoluta da curvatura inicial e antes de atingir o colapso, associada à degradação final.

Figura 4.30: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V9.1_23.

No caso do modelo V9.1_23 não foi possível comparar as análises iniciais e finais sem contacto com a solução de cloreto de Sódio, devido ao colapso ocorrido durante o ensaio. A Figura 4.30(b) representa a diferença entre a primeira leitura, aquando do início do processo corrosivo e a última estimativa possível, antes do colapso, e demonstra os níveis de corrosão dos troços. Através da Figura 4.30(a) seria admissível estimar que os Nós 2, 3 e 9 sofreram degradação e a Figura 4.30(b) confirma esta avaliação através da diferença das curvaturas inicial e final. No entanto, analisando a Figura 4.30(a) poderia concluir-se que o ponto 2 sofreria um dano assinalável, devido ao gradual desenvolvimento da variação da curvatura nesse ponto, todavia, a última estimativa de leitura realizada antes do colapso deixa de ter a maior diferença de curvatura no Nó 2 e passa a ser no Nó 3, local do colapso estrutural, sendo que este Nó se encontra no troço do fio de aço mais corroído.

O último modelo ensaiado foi o modelo V9.2_40, cujas duas últimas análises realizadas obtiveram uma variação da função da curvatura. Para além da variação

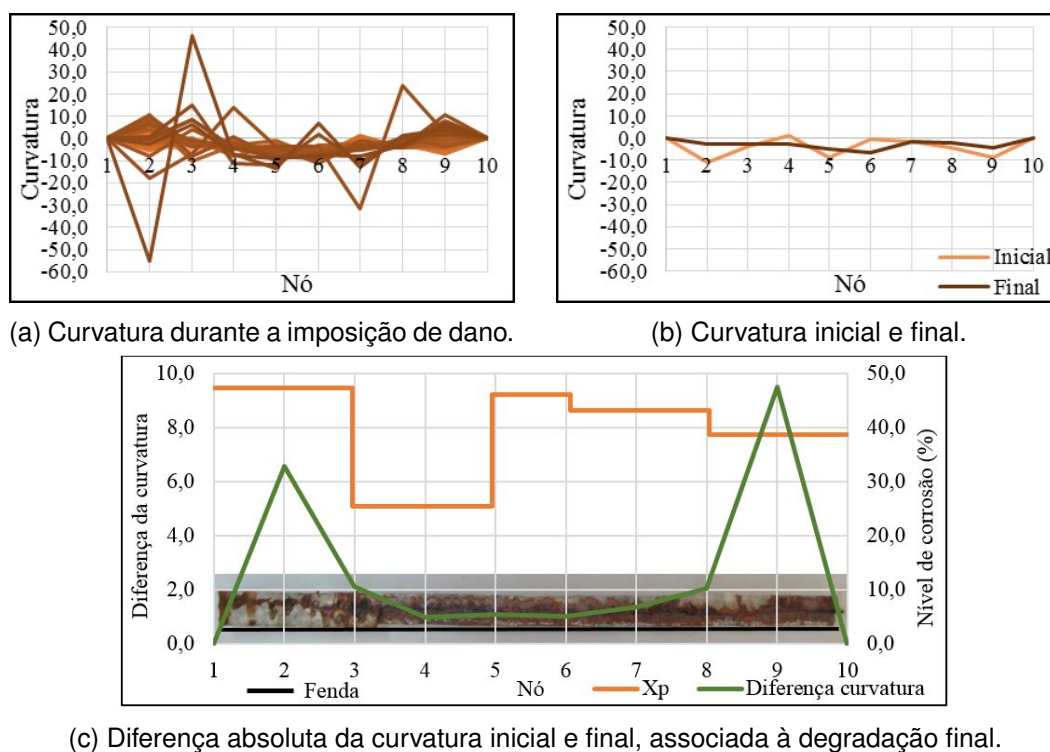


Figura 4.31: Curvatura do modo 1 ao longo do modelo V9.2_40.

da abcissa dos extremos, houve uma variação acentuada nos valores destes, passando de um contradomínio de aproximadamente $[-15;15]$ para $[-50;50]$. Esta variação deve-se ao aparecimento de fendas transversais na viga, na zona dos Nós 2 e 8/9, que, juntamente com a fenda na face inferior, levaram ao destacamento de uma parte do recobrimento do fio de aço entre estes dois nós, conforme é visível nas Figuras 4.17 e C.1. Tendo em conta a elevada percentagem de corrosão que todo o fio registou, demonstrado na Tabela 4.3, esperava-se que a zona a meio vão obtivesse uma diferença significativa na avaliação realizada pelo método das diferenças de curvatura, devido à alteração da rigidez proveniente do destacamento de 1/4 da secção ocorrida nesta zona.

Em todos os modelos ensaiados não existiu nulidade na diferença absoluta das curvaturas, com excepção das extremidades, pois todos eles sofreram degradação. Caso os valores das diferenças da curvatura se encontrem próximos de 0, considera-se que a degradação existente é nula ou homogénea ao longo do modelo. Pode dizer-se nula, pois sendo um ensaio experimental, existem factores externos não controláveis que podem afectar a estimativa. Numa degradação homogénea, a variação da rigidez é uniforme em todo o modelo, tornando desta forma a variação da curvatura nula ao longo da degradação.

Devido à degradação uniforme que se tentou aplicar nos modelos e com base nos resultados da presente secção é possível constatar que para degradações associadas a baixos níveis de corrosão, a estimativa realizada,

através da variação da curvatura, não é capaz de estimar com precisão a diminuta degradação imposta, com principal déficit nos Nós que se encontram perto das extremidades.

Nos modelos com um maior nível de corrosão, as estimativas realizadas através do método da variação da curvatura possuem uma maior precisão quando comparadas as estimativas com baixos níveis de corrosão. esta avaliação baseia-se numa melhor conjugação entre os locais dos máximos obtidos pelo método e os parâmetros de avaliação de degradação. Devido às imperfeições de fabrico e dos materiais das vigas ensaiadas, associadas à heterogeneidade no betão, surge, com o aumento da corrosão, uma heterogeneidade na degradação.

4.2.4 Deformada

Nas Figuras 4.32 e 4.33 encontram-se representados os efeitos que o processo corrosivo teve na deformada dos modelos ensaiados.

Na Figura 4.32 foram representados o valor da deformada retirada de todas as análises realizadas em todos os modelos, excepto o modelo V9.1_23. Assim sendo, cada ponto marcado no gráfico corresponde a uma análise, sendo a ordenada a deformada no momento, e a abcissa, a corrosão correspondente ao momento da análise.

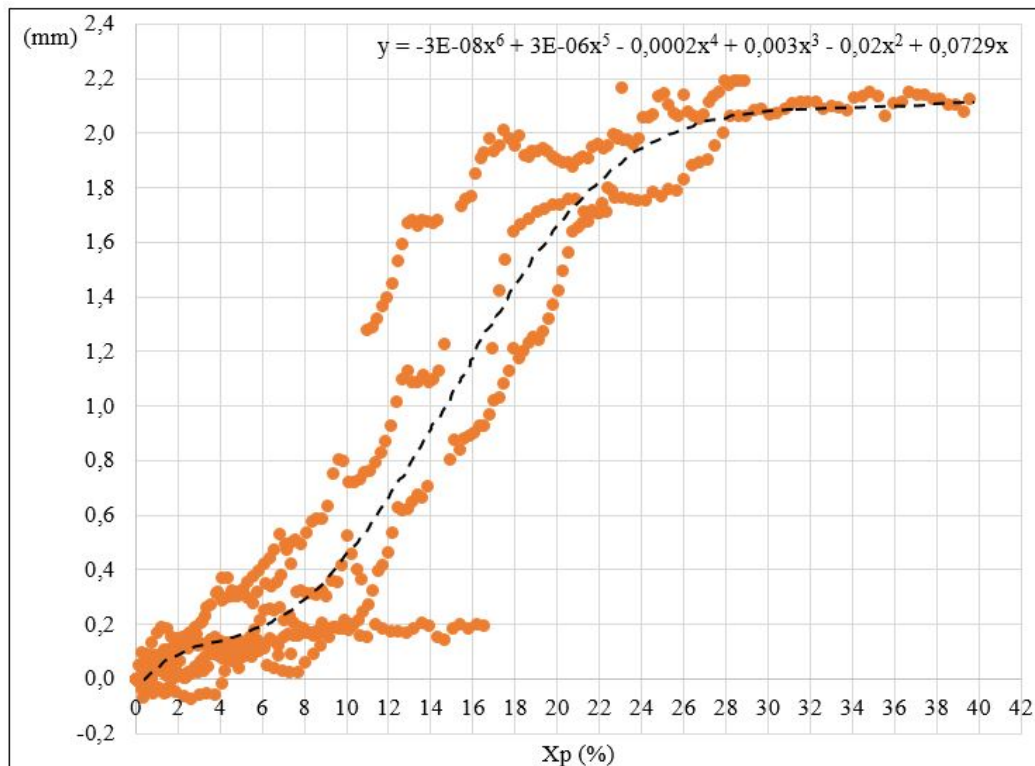


Figura 4.32: Gráfico da deformada em cada análise realizada.

Através da avaliação do gráfico, contido na Figura 4.32, foi possível constatar algumas aspectos. Sendo o primeiro, o de que mais que um modelo começou por obter, até aos 2 %, uma deformada negativa, isto é houve um aumento da contra-flecha. A segunda evidência foram os saltos dados nas deformadas de alguns modelos devido à ocorrência de algumas fendas nestes. De maneira a ter-se uma melhor noção do crescimento da deformada ao longo da corrosão, foi realizada uma regressão polinomial, representada pela linha a tracejado. Assim sendo, denota-se um crescimento diminuto da deformada até aproximadamente os 6 %, havendo nessa altura, um aumento acentuado da deformada devido ao surgimento de fendas e aumento das fendas. Contudo a partir dos 25 % de corrosão a deformada tem tendência a estabilizar.

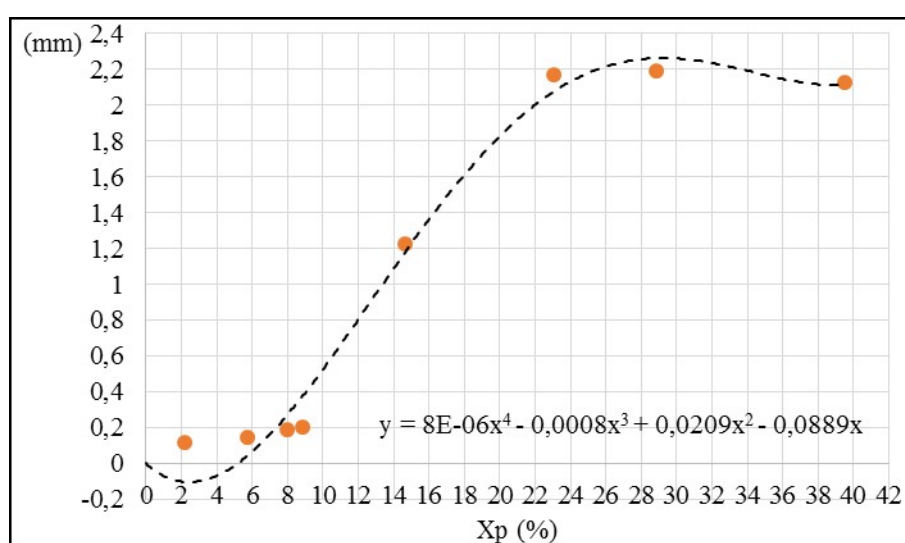


Figura 4.33: Gráfico da deformada realizada na última análise de cada modelo.

A Figura 4.33 mostra os valores das deformadas obtidas na última análise de cada modelo. Através deste gráfico foi possível chegar-se à conclusão de que as deformadas dos modelos com corrosão mais baixa, até aos 10 % não foram muito afectadas pelas poucas fendas existentes, havendo só uma ligeira diminuição da deformada causada pela perda de aderência do fio de aço pré esforçado com o betão da viga. Para comparar o evolução dos dois gráficos, foi realizada uma regressão polinomial às deformadas finais destes nove modelos, o resultado alcançado foi a linha a tracejado na Figura 4.33. Através da comparação das regressões dos dois gráficos torna-se evidente que a evolução das regressões é idêntica, tornando assim o gráfico com a evolução de todas as deformadas válido.

4.2.5 Ensaios Destrutivos

Na presente secção serão apresentados todos os resultados pertinentes provenientes dos dois ensaios realizados com técnicas destrutivas, o ensaio da carga nos modelos e o ensaio de tracção nos provetes dos fios de aço dos

modelos.

Ensaio de Tracção

Na Figura 4.34 encontra-se representado o resultado do ensaio de tracção em todos os provetes ensaiados. O único modelo em que não se apresentaram os resultados, foi o modelo VR1, pois os seus provetes foram utilizados na optimização deste ensaio. Os provetes de cada modelo encontram-se todos com a mesma cor na figura.

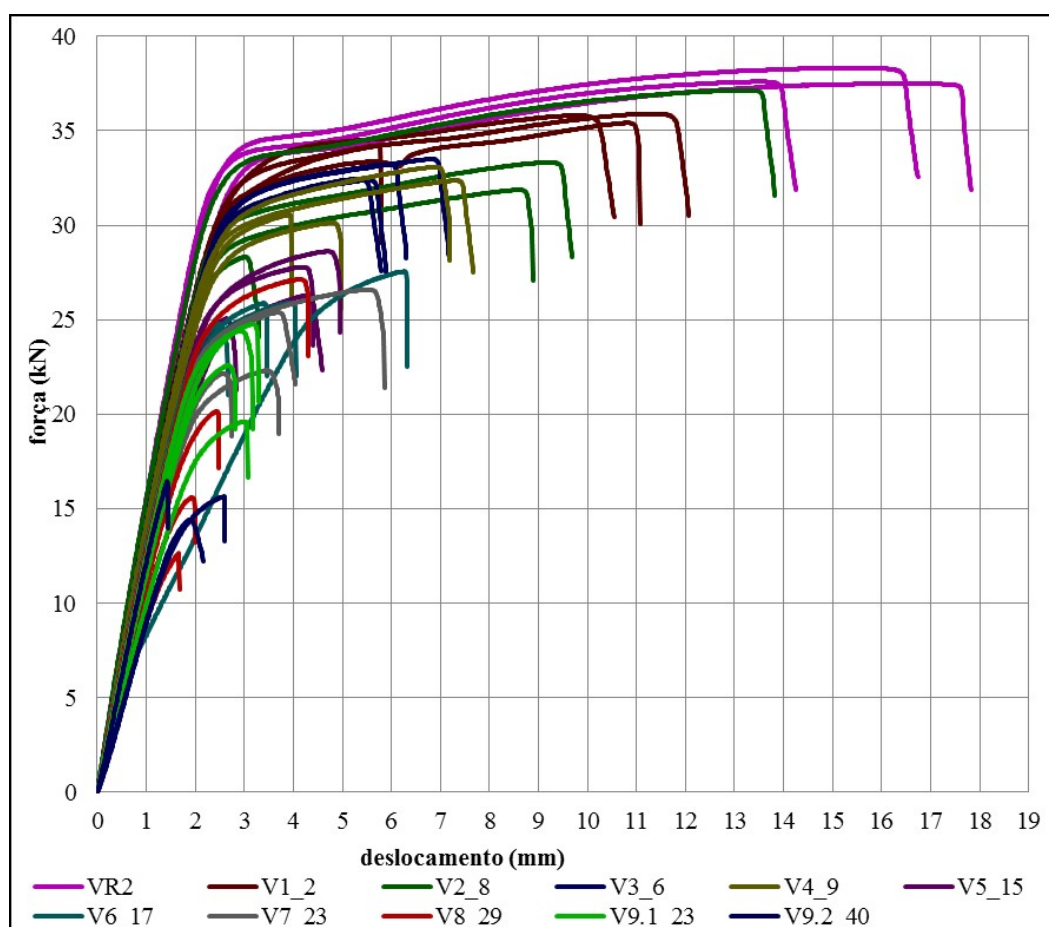


Figura 4.34: Gráfico Força-deslocamento para os provetes de aço ensaiados.

A primeira ilação que se pode retirar do gráfico 4.34 é a de que os provetes que não apresentam dano, obtêm melhores resultados tanto de carga como de deslocamento. A segunda ilação que se retirou foi a de que a carga suportada por modelo vai diminuindo com o aumentar da nível de dano no fio. No entanto para se retirarem mais comparações entre os provetes deste ensaio é necessário colocá-los nas mesmas condições de avaliação, para tal, para além do gráfico de força-deslocamento apresentado na Figura 4.34, foi elaborado um gráfico de

tensão-deformação. No cálculo das tensões teve-se em consideração a área média final que cada provete obteve, conforme é descrito na Tabela 4.3.

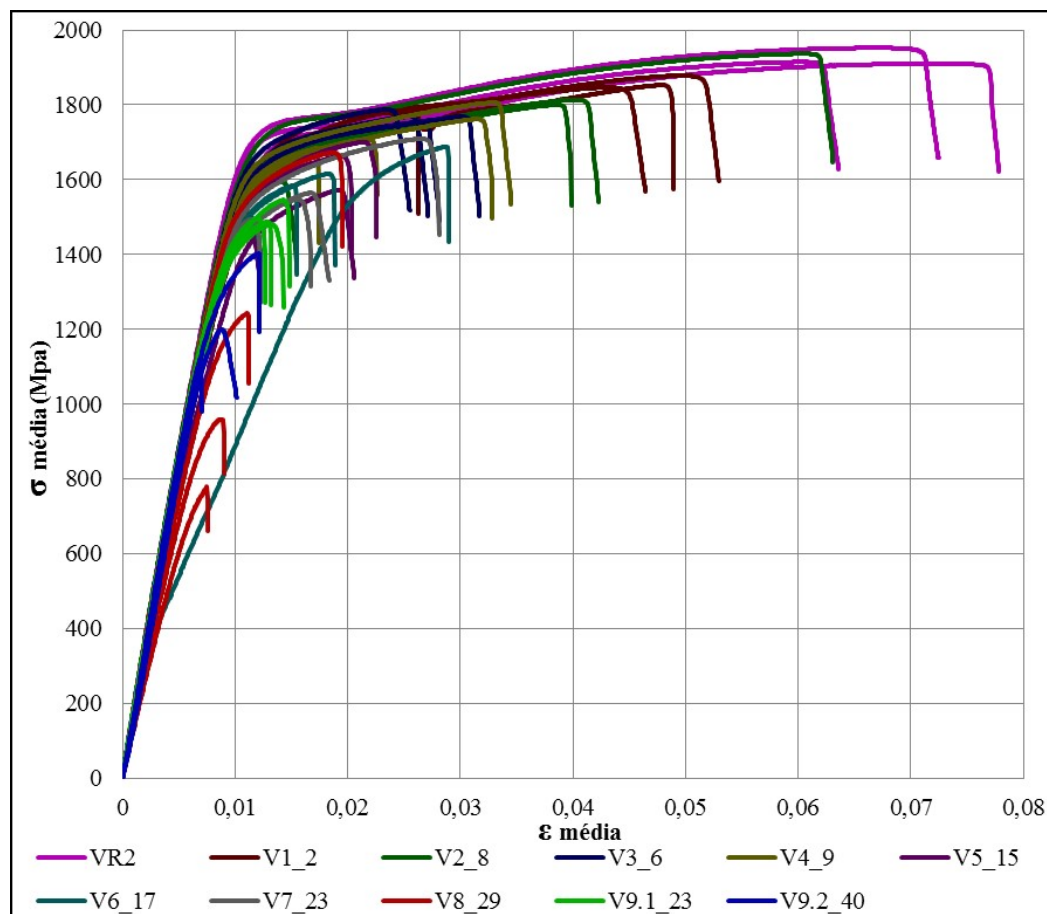


Figura 4.35: Gráfico tensão-deformação para os provetes de aço ensaiados.

Através da Figura 4.35 pode-se observar o gráfico das tensões-deformações dos resultados obtidos no ensaio da tracção dos provetes. Neste gráfico é visível que a tensão média de cedência, representada por $\sigma_{média}$, se encontra perto dos 1700 MPa para os provetes sem dano e que este de valor da tensão vai diminuindo nos restantes provetes, com o aumento de dano imposto nos respectivos fios. O mesmo se sucedeu na deformação dos provetes, tendo os provetes sem dano uma deformação na cedência de aproximadamente 0,12, que tal como a tensão vai diminuindo de valor com o aumentar da percentagem de dano.

A tensão máxima suportada pelos fios de aço também vai diminuindo com o aumentar de dano, não sendo no entanto esta diminuição tão gradual como nos resultados das cargas. A diminuição da ductilidade encontra-se associada a uma diminuição do patamar de cedência dos provetes.

Na Figura 4.36 constata-se os valores das tensão média máxima obtida em

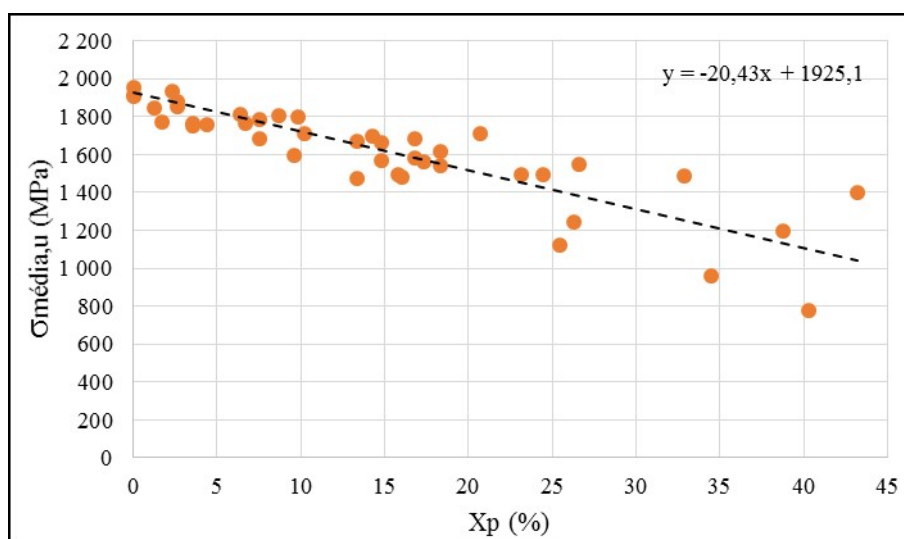


Figura 4.36: Gráfico da tensão média máxima suportada pelos provetes.

cada um dos provetes ensaiados à tracção, representados por $\sigma_{média,u}$. Cada um dos pontos marcados no gráfico representa a tensão média máxima obtida num provete com a respectiva corrosão nas abcissas. O valor da tensão média máxima sem dano é de aproximadamente 1900 MPa. Tal como nos restantes parâmetros visto, a tensão média máxima vai diminuindo com o aumentar da percentagem de corrosão no provete. Para ter-se uma maior noção da diminuição da tensão média máxima, foi realizada uma regressão linear com todos os provetes.

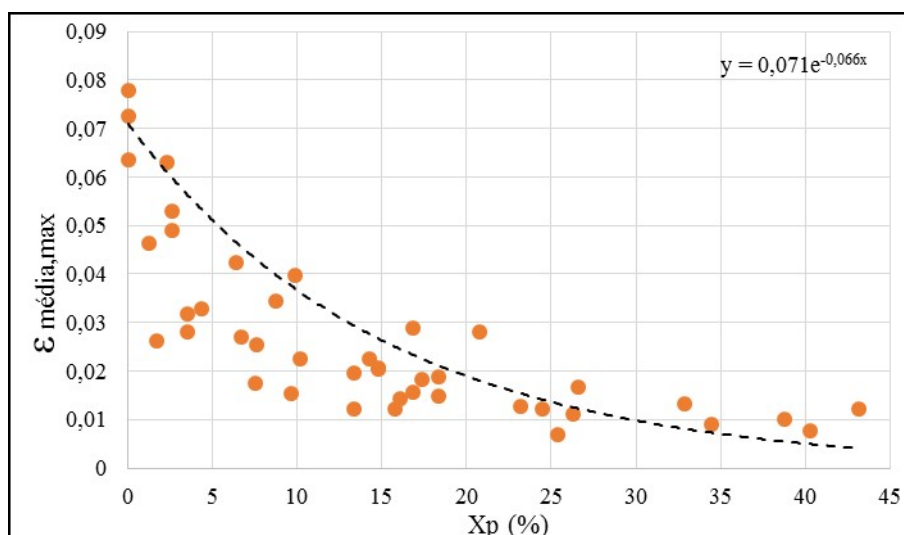


Figura 4.37: Gráfico da deformação média máxima em função do nível de corrosão.

Assim como, a tensão média máxima vai diminuindo com o aumentar de dano, também a deformação média máxima alcançada nos provetes vai diminuindo

com o aumentar da corrosão. A Figura 4.37 apresenta os valores da deformação média máxima obtidos para todos os provetes. Os provetes sem dano apresentam em média um valor de 0,071 de deformação média máxima, a diminuição da deformação média máxima segue o evolução de uma função exponencial de potência negativa.

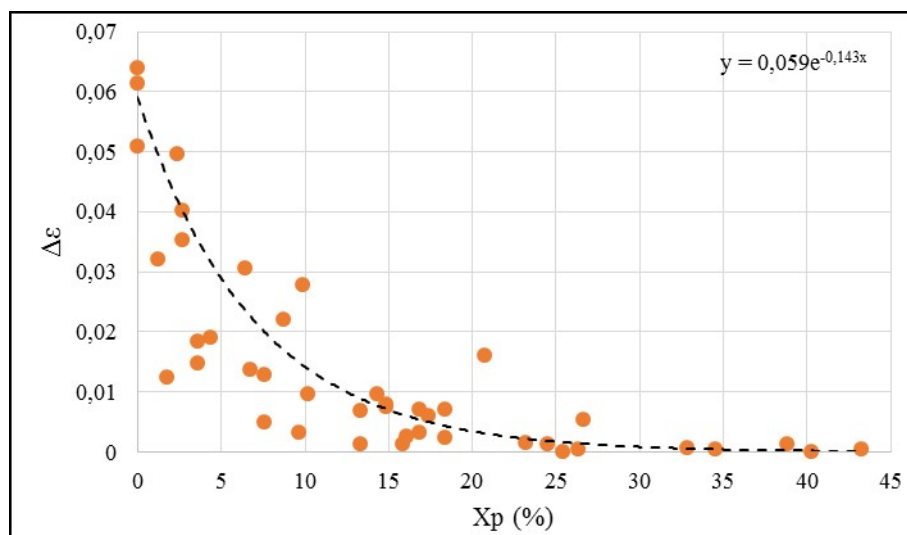


Figura 4.38: Gráfico da diferença da deformação média máxima e a deformação média no início da plastificação, em função do nível de corrosão.

Na Figura 4.38 encontra-se demonstrada a diminuição da ductilidade abordada anteriormente. É visível que através do aumento da percentagem de corrosão, os provetes tem tendência a diminuir a diferença entre a $\varepsilon_{mdia,max}$ e a $\varepsilon_{mdia,y}$, sendo $\varepsilon_{mdia,y}$ a deformação do início da plastificação e é calculada a partir do ponto onde a diferença entre dois valores de tensões seguidos seja inferior a 0,05 %. A partir dos 30 % de dano a diferença entre estas deformações é praticamente nula.

Ensaio de Flexão

No ensaio para a averiguação dos valores das cargas últimas realizado através do método dos três pontos, foram ensaiadas todas as vigas excepto as vigas dos modelos V9.1_23 e V9.2_40. A primeira por ter atingido o colapso durante o processo de dano, a segunda por apresentar demasiadas alterações de secção em relação ao modelo inicial.

Na Figura 4.39 apresentam-se os diagramas de carga-deslocamento resultante dos ensaios de carga. Neste gráfico é evidente a região da fase elástica e a região de plastificação em quase todos os modelos. No entanto, o que se pode retirar deste gráfico é que tanto a velocidade de introdução de corrosão quanto, quanto a quantidade de dano colocado são factores que influenciam bastante a resistência da viga.

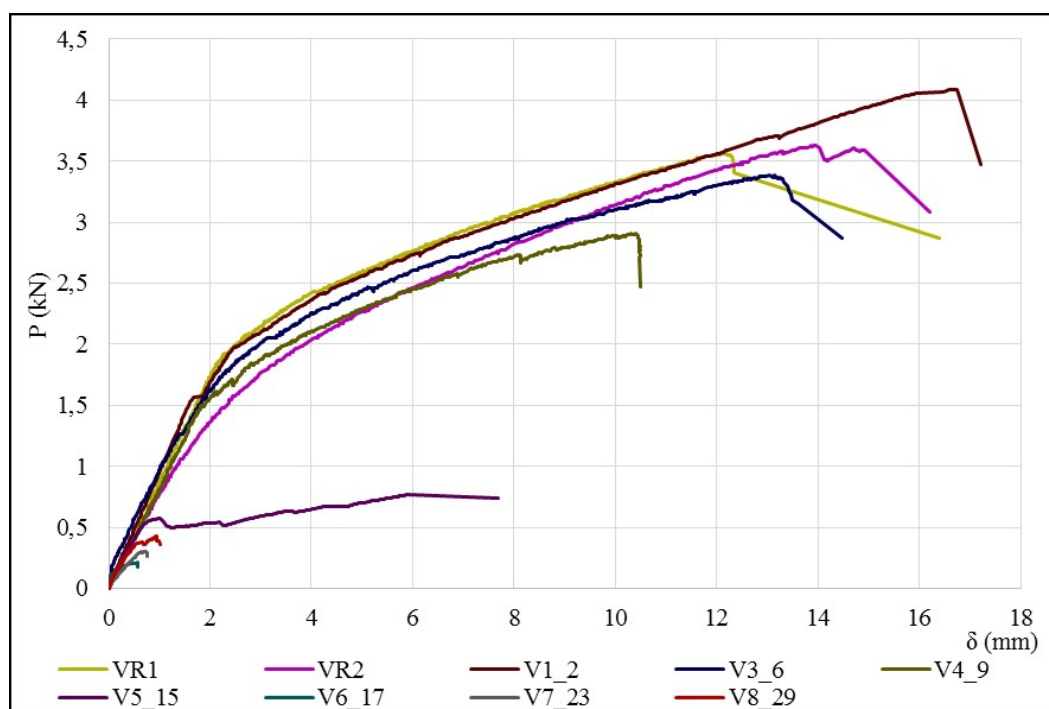


Figura 4.39: Gráfico da evolução da carga e da deformação de vários modelos, até atingirem o colapso.

A média dos valores de carga máxima suportados pelas duas vigas de referência foi de aproximadamente 3,6 kN, todos os valores das cargas máximas dos modelos estão visíveis na Figura 4.40. Com o aumentar do dano nos modelos, as cargas máximas suportadas por estes diminuíram. No entanto, a existência de fendas pode ter um efeito maior na diminuição da carga máxima do que a percentagem de corrosão no fio de aço.

A partir do modelo V5_15, com cerca de 15 % de dano, as fendas passam a ser comprometedoras para a resistência da viga, havendo assim uma redução assinalável tanto da carga suportada como da deformada. Sendo que nos modelos V6_17, V7_23 e V8_29 a deformada suportada tem uma redução drástica, tal o estado de fendilhação existente nestes modelos.

No sentido oposto, o modelo V1_2 suportou um valor de carga superior ao dos modelos sem dano, com um aumento da capacidade resistente de aproximadamente 14 %. Tal aumento pode ser visto ou como uma singularidade das propriedades do modelo ensaiado ou devido ao aumento de resistência proveniente da ocupação dos espaços vazios no interior da viga. o preenchimento destes espaços vazios é feita pelas partículas de aço que são corroídas e se separam do fio de aço, ocupando os espaços vazios existentes nas proximidades da conexão aço-betão.

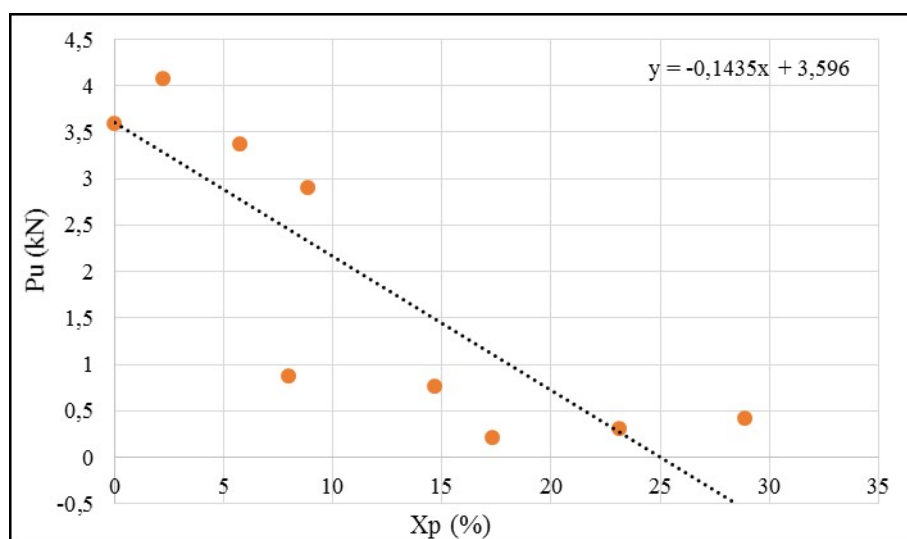


Figura 4.40: Gráfico da carga última de cada viga com a respectiva percentagem de corrosão.

A partir da regressão linear realizada no gráfico da Figura 4.40 uma conclusão possível seria que a partir dos 25 % de dano nos modelos estes deixariam de suportar carga, entrando em colapso com o peso próprio, contudo o modelo V8_29, com aproximadamente 30 % de carga aponta que a melhor regressão a ser realizada para estes pontos seria uma regressão exponencial, com uma potencia negativa, assim sendo, os valores de carga tenderiam para 0, mas seria mais perto dos 40 % de dano, o que vai de encontro ao colapso que surgiu nos modelos V9.1_23 e V9.2_40.

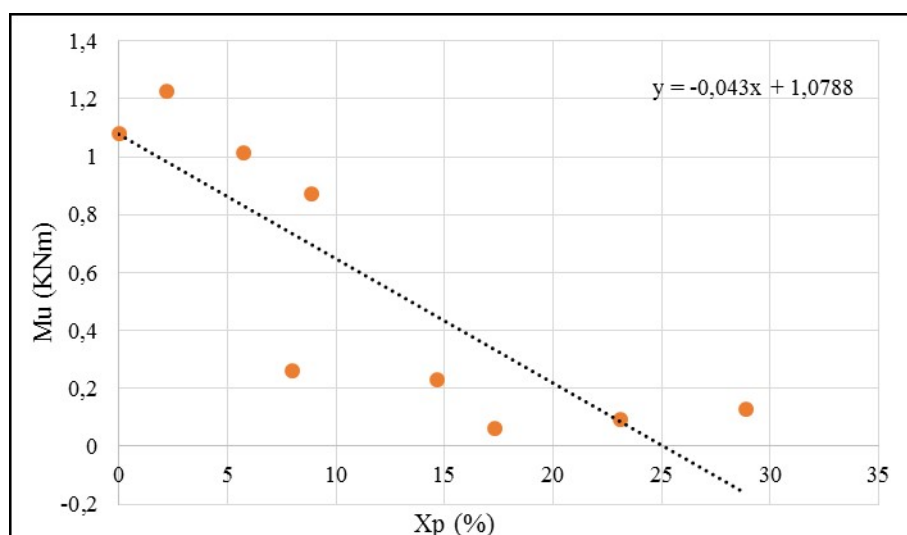


Figura 4.41: Gráfico do Momento último de cada viga com o respectivo X_p .

Os valores do momento flector último estão definidos no gráfico presente na

Figura 4.41. Tendo em conta que o valor de L é 1,20 m a única variável é o $P_{u,i}$, assim sendo, o evolução dos pontos deste gráfico é idêntico ao da Figura 4.40, tendo assim a regressão linear características e conclusões também idênticas. O valor médio do M_u das vigas de referência foi de 1,08 kNm, sendo o momento mais alto o do modelo V1_2 de 1,23 kNm.

De maneira a se ter noção de qual foi o aumento ou a diminuição do momento flector último nos diversos modelos, optou-se por normalizar os valores, tendo como denominador a média dos valores dos momentos flectores nos modelos VR1 e VR2. Este valor do momento é designado de M^* . Estes valores são representados no gráfico da Figura 4.42. Assim sendo o $M_{u,adimensional}$ das vigas referencia passa a ser unitário, enquanto que através do gráfico se percebe que o aumento de Momento flector no modelo V1_2 foi de aproximadamente 18 %. O evolução dos pontos do gráfico segue uma tendência semelhante aos anteriores.

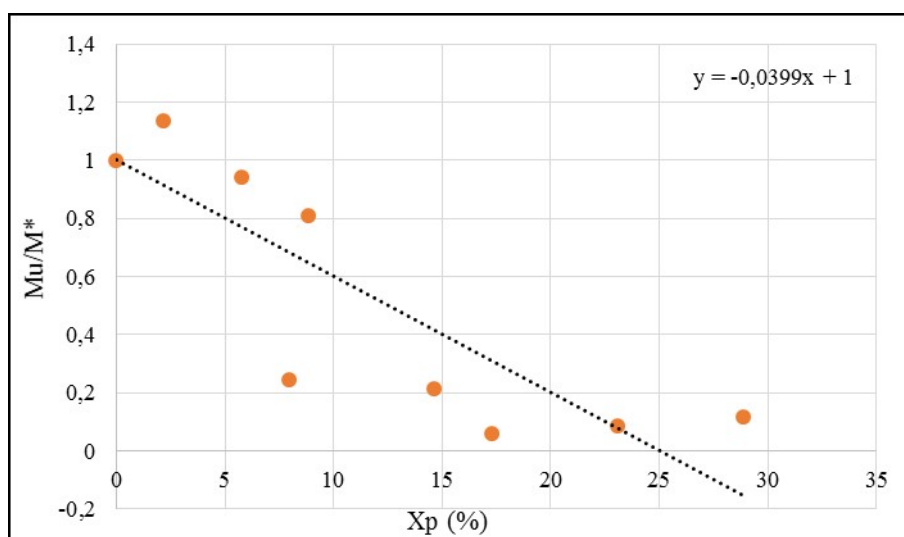


Figura 4.42: Gráfico do momento flector último adimensional em função do nível de corrosão.

Na Figura 4.43, estão representados os M_u adimensionais que foram calculados anteriormente, contudo nas abcissas desses pontos, em vez de se aplicar a média do dano obtido no modelo, aplicou-se a percentagem de dano registada no troço "m" de cada modelo. Desta maneira torna-se possível fazer a relação entre o momento flector obtido, o troço do fio onde deve ocorrer a cedência da viga. No caso do presente gráfico, a recta da regressão linear já apresenta um declive diferente dos anteriores. Isto deve-se ao valor da corrosão dos troços do meio ser em regra mais elevada que as médias dos respectivos modelos, como foi visto na Tabela 4.3 e na Figura 4.3. No entanto o evolução da regressão que melhor acompanha o evolução do $M_{u,adimensional}$ seria uma função exponencial de potencia negativa, pois com a regressão linear, fica explicito pelo gráfico que a partir de 28 % de corrosão o momento seria negativo, o que não é real.

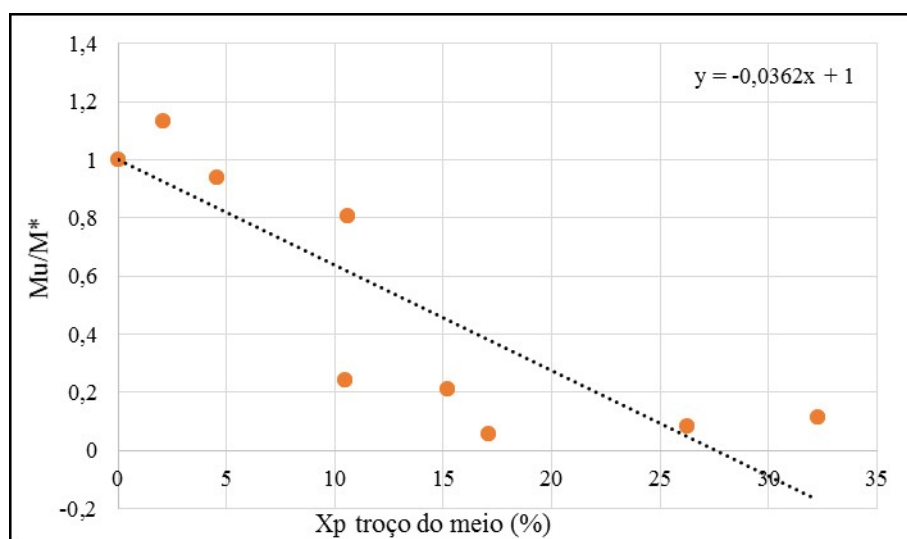


Figura 4.43: Gráfico do momento flector último adimensional em função do nível de corrosão do troço do meio.

O modo de rotura que ocorreu em cada modelo encontra-se designado na Tabela 4.5, cuja tabela apresenta as cargas últimas ocorridas em cada modelo tal como as percentagens de corrosão obtidas. É visível, através desta tabela, que o modo de rotura por esmagamento do betão ocorre pelo menos até ao valor de 2,5 % de dano. Sendo que o modelo V2_8, tratou-se do modelo com o aumento da velocidade de corrosão, criando um aumento da tensão interna que levou a uma fenda longitudinal que não era prevista para o seu valor de dano, o que pode ter influenciado o modo de rotura. Nos restantes modelos, a rotura aparenta ter ocorrido sempre devido à flexão, sendo notório nos modelos V3_6 e V4_9. Contudo, nos modelos com dano superior a 14 %, as fendas evidenciam ter um papel preponderante no modo de rotura.

Tabela 4.5: Síntese dos resultados dos ensaios de carga

Modelo	P_u (kN)	M_u (kNm)	δ_{max} (mm)	Modo de rotura	X_p (%)
VR1	3,56	16,40	1,07	Esmagamento do betão e corte	0,00
VR2	3,59	16,22	1,09	Esmagamento do betão e corte	0,00
V1_2	4,08	17,21	1,23	Esmagamento do betão	2,19
V2_8	0,88	12,59	0,26	Flexão associada a fenda longitudinal de corrosão	7,97
V3_6	3,38	14,47	1,01	Flexão	5,74
V4_9	2,90	10,50	0,87	Flexão	8,86
V5_15	0,77	13,11	0,23	Flexão associada a fenda longitudinal de corrosão	14,64
V6_17	0,21	0,58	0,06	Flexão associada a fenda longitudinal de corrosão	17,30
V7_23	0,30	0,77	0,09	Flexão associada a fenda longitudinal de corrosão	23,08
V8_29	0,42	1,01	0,13	Flexão associada a fenda longitudinal de corrosão	28,86
V9.1_23	Não foi ensaiado devido ao mau estado do elemento				23,08
V9.2_40	Não foi ensaiado devido ao mau estado do elemento				39,53

Capítulo 5

Conclusão e Desenvolvimentos Futuros

No presente capítulo, na primeira secção será realizado um resumo geral dos resultados obtidos. Na segunda secção será abordado o tema de desenvolvimentos futuros que possam realizar-se na nesta área de estudo.

5.1 Conclusões

5.1.1 Métodos de Análise de Dano

Um dos objectivos principais do presente trabalho era a verificação da praticabilidade de algumas metodologias de diagnóstico de dano baseadas em parâmetros modais. No capítulo anterior, o capítulo 4, foram esclarecidos os resultados alcançados, assim sendo, nesta secção será realizado um resumo das conclusões obtidas anteriormente.

O Método da Variação das frequências desempenhou o diagnóstico expectável, analisando adequadamente a presença de degradação em quase todos os modelos. No entanto, apenas obteve diagnósticos correctos quando a estrutura não se encontrava em contacto com solução de cloreto de Sódio.

Em relação ao Método da Variação dos Modos de Vibração, os resultados obtidos foram razoáveis, tendo em conta os pressupostos pretendidos. Este método registou e analisou adequadamente a localização de dano nos modelos com uma degradação estrutural assinalável, sendo menos preciso quando a degradação introduzida era uniforme. Contudo, os resultados das ultimas análises realizadas com os modelos em contacto com a água e sem estar em contacto, não apresentam localizações de dano compatíveis.

Devido à uniformização da degradação colocada nos modelos, a metodologia baseada na alteração das curvaturas modais nem sempre disponibilizou um diagnóstico de dano acertado. Contudo com o aumentar da degradação

estrutural, esta metodologia foi ficando mais precisa na avaliação de dano na estrutura e na sua correcta localização. Também neste método, as análises realizadas fora de água, são mais precisas.

Por último, não sendo um método de análise baseado nos parâmetros modais, torna-se possível extrapolar o dano devido a corrosão existente neste tipo de elementos estruturais, através do acompanhamento da deformada e da aplicação da equação da regressão $\delta = -3 * 10^{-8} * X_p^6 + 3 * 10^{-6} * X_p^5 - 0,0002 * X_p^4 + 0,003 * X_p^3 - 0,02 * X_p^2 + 0,0729 * X_p$.

5.1.2 Corrosão

As principais conclusões obtidas pelo estudo da corrosão estão relacionadas com os ensaios destrutivos. Sofrendo, como seria expectável, uma diminuição da resistência à flexão no modelo, é possível registar um aumento da capacidade resistente quando os valores da corrosão são inferiores a 5 %. Isto deve-se possivelmente ao preenchimento dos vazios por parte da massa de aço perdida na corrosão.

Registou-se uma diminuição da tensão de rotura por tracção nos varões, associado ao aumento de corrosão em ambos. Para além da diminuição desta tensão, foi possível verificar também, a diminuição da ductilidade existente nos varões corroídos.

Segundo o valor do desvio padrão relativo, de aproximadamente 25 % por varão, a corrosão podia ser mais uniformizada em cada modelo. Sendo que se pretendia que a corrosão fosse aplicada de uma forma uniforme no varão, é demonstrado que a corrosão aplicada teve uma tendência de ataque por *pite*. Assim sendo, chega-se à conclusão que a metodologia empregue ainda possui margem para desenvolvimento.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Tendo em conta os estudos realizados, seria interessante desenvolver esta temática através dos trabalhos, que serão descritos de seguida:

- O principal trabalho proposto seria a continuação do estudo dos métodos utilizados em elementos de betão armado com outras dimensões. Desta forma as metodologias empregues poderiam detectar o dano com mais acerto;
- Aplicação de outras metodologias de detecção de dano, baseadas em parâmetros modais, tais como o Método da Flexibilidade ou o Método Indicador de Dano [49];

- Outro trabalho possível, seria um trabalho idêntico ao agora realizado, com a aplicação de dano preparada de uma maneira distinta, tentando assim registar as medições que foram prejudicadas pelo facto dos modelos se encontrarem em contacto com a água;
- Seria relevante, para a avaliação da praticabilidade dos Métodos, que o dano fosse localizado num determinado ponto dos modelos, em vez de dano uniforme como foi aplicado no presente trabalho;
- Por fim, em relação ao estudo da corrosão, seria interessante a realização de trabalho desenvolvido tendo em conta a avaliação do início do surgimento da fendilhação devido à corrosão, uma vez que contribui largamente para a diminuição dos valores de resistência máxima.

Bibliografia

- [1] R. D. Adams, P. Cawley, C. J. Pye, and B. J. Ston. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1978.
- [2] R. D. Adams, D. Walton, J. E. Flitcroft, and Short. Vibration testing as a non-destructive test tool for composite materials. *Composite Reliability*, 1975.
- [3] S. Ahmad. Techniques for inducing accelerated corrosion of steel in concrete. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(2C):10, December 2009.
- [4] Z. Ahmad. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Butterworth-Heinemann, 2006.
- [5] A. E. Aktan, M. K. Lee, C. Chuntavan, and T. Aksel. Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities.
- [6] A. A. Almusallam. Effect of degree os corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and Building Materials*, 2000.
- [7] A. A. Almusallam, A. S. Al-Gahtani, A. R. Aziz, and Rasheeduzzafar. Effect of reinforcement corrosion on bond strength. *Construction and Building Materials*, 1995.
- [8] C. Andrade and C. Alonso. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 2001.
- [9] ASTM G1. Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens, 1999.
- [10] A. S. Azher. A prepredict model for the residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams. Master's thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, 2005.
- [11] Presdouro Pré esforcados Beira-Douros S.A. URL: <http://www.presdouro.pt/preesforco/familias/Fripas.htm>.
- [12] Comité Euro-International du Béton (CEB). *Durable concrete structures*. Thomas Telford, 1992.

- [13] E. Cavaco. *Robustness of Corroded Reinforced Concrete Structures*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [14] P. Cawley and R. D. Adams. The location of defects in structures from measurement of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1979.
- [15] J. Chance, G.R. Tomlinson, and K. Worden. A simplified approach to the numerical and experimental modeling of the dynamics of a cracked beam. *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 778-785, 1994.
- [16] A. Costa. *Patologia do Betão Armado - Anomalias e mecanismos de deterioração*. Instituto Superior Técnico. URL: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/EBAP/ReabReforcoPontes/modulo2-1.pdf>.
- [17] J. S. Cruz, V.M.C.F. Cunha, A. Camões, J.A.O. Barros, and P. Cruz. Modeling of bond between galvanized steel bars and concrete. *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 2009.
- [18] T. C. Diamantino. Avaliação do impacto da corrosão na economia da portuguesa. Divisão Técnica de Corrosão e Proteção de Materiais, Abril 2013.
- [19] Z. Dimitrovová. *Resistência Materiais - Cap 8*. Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013. URL: http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Resistencia_materiais_LEG/upgrade/cap8.pdf.
- [20] S. W. Doebling. *Measurement of structural flexibility matrices for experiments with incomplete reciprocity*. PhD thesis, University of Colorado, 1995.
- [21] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Identification Methods, The Shock and Vibration Digest*, 1998.
- [22] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. *The Shock and vibration Digest*, 1996.
- [23] FIB. *Bond of Reinforcement in Concrete: State-of-art Report*. Bulletin 10 (fib Fédération internationale du béton). International Federation for Structural Concrete, 2000.
- [24] R. Folié. Durability design of concrete structures - part 1: Analysis fundamentals. *Architecture and Civil Engineering*, 2009.
- [25] P. Frade. Modelação do efeito de corrosão localizada em estruturas de betão armado. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2015.

- [26] V. Gentil. *Corrosão*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.
- [27] J.A. González, C. Andrade, C. Alonso, and S. Feliu. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 1995.
- [28] A. Groysman. *Corrosion for Everybody*. 2009.
- [29] M. Guerreiro. Identificação de dano estrutural com base em análise modal. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [30] Bong Seok Jang and Byuang Hwan Oh. Effects os non-uniform corrosion on the cracking and service life of reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 2009.
- [31] Jeong-Tae Kim, Yeon-Sun Ryu, Hyun-Man Cho, and N. Stubbs. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Engeneering Structures*, 2003.
- [32] Min Ook Kim, A Bordelon, Myung Kue Lee, and Byung Hwan Oh. Cracking and failure of patch repairs in rc mambers subjected to bar corrosion. *Construction and Building Materials*, 2015.
- [33] G. H. Koch, M. P.H. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani, and J.H. Payer. Corrosion costs and preventive strategies in the united states, 2002. URL: <http://www.nace.org/Publications/Cost-of-Corrosion-Study/>.
- [34] H. Lopes. Estudo do fluxo de energia em vigas e placas. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Univesidade do Porto, 2001.
- [35] E. McCafferty. *Introduction to Corrosion Science*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [36] F. Merçon, P. I. C. Guimarães, and F. B. Mainier. Corrosão: Um exemplo usual de fenômeno químico. *Química Nova na Escola*, 2004.
- [37] A. K. Pandey, M. Biswas, and M. M. Samman. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 1991.
- [38] A. Perdrix and M. Carmen. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Editora Peni, 1992.
- [39] H. A. Ponte. *Disciplina: Eletroquímica aplicada e corrosão TQ-417. Fundamentos da Corrosão*. Universidade Federal do Paraná. URL: <http://www.gea.ufpr.br/arquivos/lea/material/Fundamentos%20da%20Corrosao.pdf>.
- [40] M. Pourbaix. *Lectures on Electrochemical Corrosion*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [41] A. Rodrigues. Vibrações transversais em vigas finitas sujeitas a cargas móveis - radiação de transição associada à mudança brusca da rigidez vertical de fundação. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [42] J. Rodrigues. *Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2004.
- [43] O. S. Salawu. Detection of structural damage through changes in frequency : a review. *Engeneering Structures*, 1997.
- [44] M Salta and A Santos Silva. Estruturas de betão - processo de deterioração. In *Manutenção e Reparação de Estruturas*, 2013.
- [45] R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia, and J. M. M. Silva. Damage detection using the frequency response - frequency-response function curvature method. *Journal of Sound and Vibration*, 1999.
- [46] J. Santos. Estudo do efeito simulado da corrosão no comportamento mecânico de varões de aço para betão armado. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade nova de Lisboa, 2010.
- [47] T. Santos. Corrosão das armaduras do betão armado: Causas, consequências, prevenção e projeto de durabilidade. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- [48] N. Stubbs and Jeong-Tae Kim. Damage localization in structures without baseline modal parameters. *AIAA Journal*, 1996.
- [49] N. Stubbs, J.-T. Kim, and C. Farrar. Field verification of a non destructive damage localization and severity estimation algorithm. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1995.
- [50] Fujian Tang, Genda Chen, and Weijian Yi. Corrosion-induced concrete cracking, steel-concrete bond loss, and mechanical degradation of steel bars. *Advanced Materials Research*, 2014.
- [51] J. K. Vandiver. Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response. *Journal of Petroleum technology*, 1977.
- [52] T. Vidal, A. Castel, and R. François. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 2002.
- [53] R. A. Votsis and M. K. Chryssanthopoulos. Assessment of debonding in gfrp joints using damage identification techniques. *Construction and Building Materials*, 2009.
- [54] Ruijin Zhang, A. Castel, and R. François. Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of rc beam during chlchloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 2009.

- [55] Weiping Zhang, Binbin Zhou, Xianglin Gu, and Hongchao Dai. Probability distribution model for cross-section area of corroded reinforcing steel bars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014.
- [56] EN 10002-1 - Metallic Materials - Tensile testing - Part 1: Method of testing at ambient temperature, 2001.
- [57] EN 10138-2 - Prestressing Steel - Part 2: Wires, 2000.
- [58] Corrosion costs and preventive strategies in the United States. Technical report, NACE International, 1998.
- [59] EN ISO 377 - Steel and Steel products - Location and preparation of samples and test pieces for mechanical test, 1997.

Apêndice A

Frequência Própria da Viga Simplesmente Apoiada

A equação A.1 representa a fórmula da frequência natural de uma viga simplesmente apoiada, para cada um dos modos n [34].

$$f_{v.s.a.} = \frac{n^2 \pi}{2L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \quad (\text{A.1})$$

No qual:

$f_{v.s.a.}$ é a frequência própria de uma viga simplesmente apoiada, em Hz;

n é o modo de vibração escolhido, $n=1,2,3...$

L é a distância entre os apoios, logo o comprimento total da viga, em metros;

E é o módulo de young do material utilizado na viga, aplicado geralmente em kPa;

I é o momento de inércia na direcção que se está a estudar, geralmente aplicado em m^4 ;

ρ é a massa volúmica do material constituinte da viga, geralmente aplicada em ton/m^3 ;

A é a área da secção , geralmente aplicada em m^2 .

Apêndice B

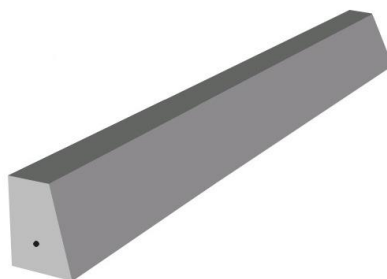
Ficha Técnica das Vigas



FICHA TÉCNICA DO PRODUTO

FQ031/1

RIPAS



Ripas de Betão Pré-esforçado para utilização em coberturas

CARACTERÍSTICAS

Dimensões (mm)				Tolerâncias Dimensionais (mm)			Resistência à Flexão (kN)	Peso Aproximado / m (kg)	Un / Palete
Comp.	Larg. Maior	Larg. Menor	Alt.	Comp.	Larg.	Alt.			
Variável	45	32	60	± 25	± 5	-5; +10	≥ 1,5	6,0	Vendas à unidade



Pré-esforçados Beira Douro, S.A.
 Albergaria – Apartado 141
 4524 - 909 Santa Maria da Feira
 Tel: 256910370 / Fax: 256917125/911619
 www.presdouro.pt / presdouro@presdouro.pt

Elaborado:
Paula Henriques

Aprovado:
Serafim Costa

Data:
02/07/2012

Apêndice C

Fendas Laterais nos Modelos



Figura C.1: Fenda na face oblqua dos modelos



Figura C.2: Fenda na face vertical dos modelos

